



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**EVALUACIÓN DE MÚLTIPLES ÍNDICES PARA LA  
CARACTERIZACIÓN DEL INICIO Y FINALIZACIÓN DEL MONZÓN  
DE SURAMÉRICA**

Autor

Isabel Cristina Correa Sánchez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2019



EVALUACIÓN DE MÚLTIPLES ÍNDICES PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL INICIO Y  
FINALIZACIÓN DEL MONZÓN DE SURAMÉRICA

Isabel Cristina Correa Sánchez

Trabajo de grado  
como requisito para optar al título de:  
Ingeniera Ambiental

Asesora

Paola Andrea Arias Gómez

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental  
Medellín, Colombia  
2019

## ABSTRACT

En este trabajo se evalúan múltiples métodos para la estimación del inicio y finalización del Monzón de Suramérica (SAMS) durante el periodo 1979-2010. Los resultados obtenidos a partir de índices basados en precipitación, radiación de onda larga y funciones ortogonales empíricas combinadas (LISAM) muestran un retraso en el inicio del SAMS, mientras que las fechas de finalización no evidencian cambios marcados en el tiempo. Lo anterior indica que los cambios observados en la duración de la temporada húmeda en el Amazonas dependen principalmente de variaciones en el inicio de esta temporada, como ha sido identificado en estudios anteriores. Por su parte, el estudio de Jones y Carvalho (2013) identifica inicios tempranos, finales tardíos y una mayor duración del SAMS durante el periodo 1979-2010 mediante el método LISAM. Sin embargo, en este Trabajo de Grado no fue posible reproducir dichos resultados; por el contrario, se identificó una tendencia de inicio tardío del SAMS entre 1979-2005, aun empleando el mismo método de Jones y Carvalho (2013). Por otro lado, los patrones climatológicos de precipitación y circulación en superficie y en alta troposfera asociados al SAMS son mejor representados mediante el índice basado en estimaciones de precipitación; sin embargo, todos los métodos presentan dificultades generales al representar la circulación a 200 hPa. Finalmente, nuestros análisis sugieren que el incluir la región del nordeste de Brasil en la caracterización del SAMS tiende a alterar las estimaciones principalmente de su inicio. En particular, la tendencia de inicios tardíos del SAMS se evidencia al emplear todos los índices en dominios que no incluyen el nordeste de Brasil, mientras que esta tendencia desaparece cuando esta zona es incluida, lo que denota sensibilidad de los índices al dominio espacial considerado.

### 1 Introducción

Los sistemas monzónicos han sido reconocidos como un elemento importante de los regímenes tropicales de precipitación en verano. Estos sistemas se generan debido al contraste térmico entre las regiones continentales y los océanos y se caracterizan por un cambio estacional en la dirección de la circulación de gran escala (Higgins et al. 2003; Vera et al. 2006; Silva y Carvalho 2007). En zonas donde se presentan circulaciones monzónicas, localizadas en bajas latitudes, más del 50% de la precipitación total anual tiene lugar durante el verano, resaltando la importancia de estos sistemas en el mantenimiento de ecosistemas, el soporte a las comunidades y en la regulación hídrica de amplias regiones (Arias et al. 2015; Vera et al. 2006; Fu et al. 2013).

Previos estudios han identificado un régimen monzónico de verano en América del sur (Zhou y Lau 1998). Entre sus principales características se encuentran: (i) un anticiclón en la alta troposfera, localizado sobre el Altiplano Boliviano (conocido como El Alta de Bolivia), (ii) una banda de nubosidad orientada desde el noroeste hacia el sureste del continente, denominada la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (SACZ, por sus siglas en inglés), (iii) altas temperaturas en superficie previas al inicio de la temporada húmeda, y (iv) el jet de Bajo Nivel de Suramérica, que se desarrolla al este de Los Andes (Marengo et al. 2012; Debortoli et al. 2015; Gan et al. 2004; Carvalho y Jones 2013; Silva y Carvalho 2007).

Así, diferentes estudios han identificado los procesos que dan inicio a la circulación monzónica en Suramérica. Wang y Fu (2002) sugirieron que la temporada de lluvias en el Amazonas inicia en la zona noroccidental de la misma, debido a un aumento en la frecuencia de los vientos del flujo trans-ecuatorial del norte a partir de la primavera austral. Li y Fu (2004) sugirieron que la transición de la temporada seca a la húmeda se presenta en 3 etapas: a) una etapa inicial, en la que aumentos de flujos de calor latente y humedad en superficie generan incrementos en la precipitación; b) una etapa de

desarrollo, cuando se genera el cambio del régimen de vientos desde el sur a vientos desde el norte, los cuales transportan aire húmedo hacia el Amazonas; y c) una fase madura en la que se intensifica el flujo de vientos desde el norte, incrementando la convergencia de humedad. Por otro lado, Liebmann y Marengo (2001) propusieron que la influencia de las temperaturas superficiales del mar (SST por sus siglas en inglés), tanto del océano Pacífico como del Atlántico en la temporada de lluvias en la región del Amazonas radica más en la variabilidad de su inicio y finalización, que en sus tasas de precipitación.

Además de los estudios realizados para mejorar el entendimiento del Sistema Monzónico de Suramérica (el cual se denominará a lo largo de este estudio como SAMS), múltiples análisis se han llevado a cabo para conocer las implicaciones del cambio climático y las actividades antrópicas en esta circulación. En Arias et al. (2015) se identificaron inicios tardíos del SAMS ocurridos desde 1978, relacionándose con SST más cálidas en el Océano Atlántico, y a variaciones asociadas a la ocurrencia de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), entre otros procesos. Fu et al. (2013) sugirieron que el aumento en la duración de la temporada seca en el sur del Amazonas se debe a un cambio en el jet subtropical sobre el continente y a un aumento en el índice de inhibición convectiva (CIN) entre junio y agosto. Por otro lado, se ha encontrado evidencia que retrasos en el inicio de la temporada de lluvias en el Amazonas están fuertemente influenciados por forzamientos antropogénicos, como la deforestación. Por ejemplo, Debortoli et al. (2015) demostraron, con base en análisis basados en pluviómetros a lo largo de una zona de transición entre el Amazonas y el Cerrado Brasileiro, que en regiones deforestadas se presenta un mayor número de tendencias negativas en las tasas de precipitación en la primavera y otoño austral. Leite-Filho et al. (2019) sugieren que a tasas de deforestación entre 50-60%, se da un retraso de hasta una semana en el inicio de la temporada de lluvias en el sur del Amazonas. Por su parte, Butt et al. (2011) reafirman la importancia de la cobertura del suelo en la transición de la temporada seca a la húmeda, pues los patrones de precipitación son influenciados por cambios en el balance radiativo como consecuencia de la deforestación. Estudios basados en modelación indican que bajo escenarios de deforestación se obtienen temporadas secas de mayor duración en el sur del Amazonas, debido a reducciones en la duración de la temporada de lluvias en esta región (Costa y Pires 2010; Agudelo et al. 2019; Ruiz-Vásquez et al. 2019).

Diversos estudios han caracterizado las fechas de inicio y finalización del SAMS. Usando datos de Radiación de Onda Larga (OLR), Kousky (1988) definió el inicio de la temporada de lluvias en Suramérica como el pentad (periodo de 5 días) antes del cual 10 de 12 pentads consecutivos presentan valores mayores a  $240\text{Wm}^{-2}$  y después del cual 10 de 12 pentads consecutivos tienen valores menores a  $240\text{Wm}^{-2}$ . Horel et al. (1989) definieron un estadístico estimado como el cociente entre el número de celdas con valores de OLR menores a  $200\text{Wm}^{-2}$  y el número total de celdas, mediante el uso de datos de OLR cada 5 días (pentads). Dicho estadístico, calculado para subdivisiones dentro de la región de estudio, busca determinar convección intensa y frecuente como indicador de la temporada de lluvias en el continente. Gan et al. (2006) definieron cuatro índices basados en las componentes del viento para la determinación de las fechas de inicio y finalización del SAMS. Wang y Fu (2002) destacaron la importancia del flujo trans-ecuatorial para la definición del inicio y el final de la temporada de lluvias en Suramérica por medio de un método basado en el viento meridional a 950 hPa, el cual busca identificar cambios en los regímenes de vientos desde el sur a vientos desde el norte. Por otro lado, Marengo et al. (2001), Li y Fu (2004), Fu et al. (2013), Yin et al. (2014) y Arias et al. (2015) emplearon un criterio similar al de Kousky (1988), pero a partir de datos de precipitación, el cual identifica el inicio de la temporada de lluvias cuando se supera un valor determinado de precipitación en 6 de 8 pentads consecutivos. Métodos basados en datos de precipitación de pluviómetros también han sido utilizados por Debortoli et al. (2015), Liebmann y Marengo (2001) y Butt et al. (2011), entre

otros, para los que los resultados dependen fuertemente de la ubicación del sensor, y por lo tanto, adquieren una connotación local. Adicionalmente, Silva y Carvalho (2007) desarrollaron un índice (LISAM) basado en funciones ortogonales empíricas combinadas que relaciona cinco variables (precipitación, viento zonal y meridional, temperatura y humedad específica en superficie) y que busca maximizar la varianza conjunta de las mismas para identificar los mecanismos relacionados con el SAMS.

Aun cuando se ha mejorado nuestra comprensión respecto al SAMS, en particular su variabilidad inter e intra-anual, sus características a largo plazo y los procesos que permiten su desarrollo, aún existen incertidumbres en cuanto a la capacidad de los diferentes índices considerados en la literatura para representar la evolución de las fechas de inicio y finalización en el tiempo. Por ejemplo, estudios basados en índices de precipitación identifican una tendencia de inicio tardío del SAMS desde 1979 en asociación con una temporada seca de mayor duración (Seth et al. 2010; Fu et al. 2013; Arias et al. 2015; Debortoli et al. 2015). Por el contrario, Jones y Carvalho (2013) identifican una tendencia de inicios tempranos, finales tardíos y una mayor duración del SAMS durante el periodo 1979-2010.

Por tanto, el objetivo de este estudio es evaluar múltiples índices desarrollados para la caracterización del inicio y la finalización del Monzón de Suramérica, buscando identificar las causas en las diferencias encontradas en cuanto al inicio y duración del SAMS al emplear índices basados en precipitación y el índice LISAM. En la sección 2 se describen los datos y metodologías utilizadas. La sección 3 presenta y analiza los resultados obtenidos en cuanto a las fechas de inicio y finalización obtenidas a partir de los diferentes métodos, la influencia del dominio espacial sobre dichas estimaciones y la capacidad de representación de las principales características del SAMS por parte de estos índices. Finalmente, la sección 4 contiene el resumen de los resultados obtenidos a partir del estudio y resalta las principales conclusiones del mismo.

## **2 Datos y Metodología**

En este estudio se emplearon tres métodos diferentes desarrollados para la estimación de las fechas de inicio y finalización del SAMS, utilizando datos en pentads (promedio de 5 días) desde 1979 hasta 2010.

El uso de promedios de 5 días remueve los efectos de las variaciones a escala sinóptica y diaria observados en la precipitación (Horel et al. 1989). Los tres índices considerados basan sus estimaciones en diferentes parámetros: a) un índice basado en la estimación de Funciones Ortogonales Empíricas Combinadas de las anomalías de precipitación, viento zonal y meridional, temperatura y humedad específica a 850 hPa, conocido como el Índice de Gran Escala para el Monzón de Suramérica (LISAM) (Silva y Carvalho 2007); b) un índice basado en Radiación de Onda Larga (Kousky 1988); y c) un índice basado en precipitación (Li y Fu 2004).

El índice LISAM se estimó para efectos de comparación con dos estudios anteriores: Silva y Carvalho (2007) y Jones y Carvalho (2013). Para la reproducción de LISAM según lo planteado en Silva y Carvalho (2007), se usaron datos de precipitación del Global Precipitation Climatology Project (GPCP; Xie et al. 2003) y datos de reanálisis del NCEP/NCAR (Kalnay et al. 1996) para las demás variables. Por su parte, para la estimación de LISAM según Jones y Carvalho (2013) se usaron datos de precipitación del Climate Prediction Center Unified Gauge (CPCU; Chen et al. 2008) con tamaño de cuadrícula de  $0.5^\circ$  en latitud y longitud, mientras que los datos de temperatura, humedad específica y viento zonal y meridional a 850 hPa se obtuvieron del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR; Saha et al. 2010) con tamaño de cuadrícula  $0.5^\circ$  de latitud y longitud.

Para el índice de OLR se usaron datos de Radiación de Onda Larga del National Center for Atmospheric Research (NCAR) (Liebmann y Smith 1996) de 2.5° latitud x 2.5° longitud. Finalmente, para el índice basado en precipitación se emplearon los datos de CPCU.

Las fechas de inicio y finalización para LISAM se obtuvieron a partir del primer componente principal (PC1) correspondiente al modo de mayor varianza explicada. El inicio se obtiene cuando la curva suavizada del PC1 (por medio de una media móvil de 3 pentads) cambia de valores negativos a positivos, mientras que cambios de valores positivos a negativos representan la finalización del SAMS (Jones y Carvalho 2013). Para el índice basado en OLR, el inicio del SAMS se determinó a partir del pentad después del cual los valores de OLR son menores a  $240 \text{ Wm}^{-2}$  en 10 de 12 pentads consecutivos y antes del cual se supera este valor en el mismo número de pentads (Kousky 1988). Similarmente, para el índice basado en precipitación, las fechas de inicio se definieron como el pentad antes del cual la tasa de precipitación es menor a la media climatológica anual por 6 de 8 pentads consecutivos y después del cual este límite se supera por el mismo número de pentads (Li y Fu 2004; Fu et al. 2013; Arias et al. 2015). Criterios contrarios se aplican para las fechas de finalización obtenidas con estos dos índices (OLR y precipitación). Para los tres índices, la duración del SAMS se define como el número de días entre el inicio y el final de cada temporada de lluvias.

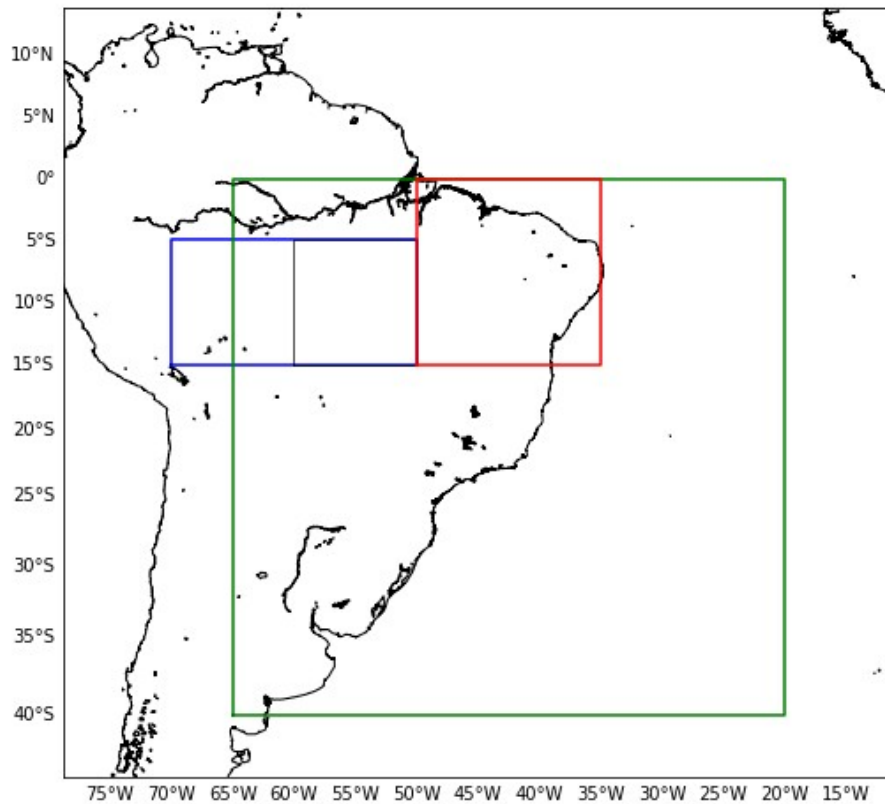
Se obtuvieron series de tiempo para el inicio, final y duración del SAMS en cuatro diferentes dominios espaciales (Fig. 1) : a) 0-40°S, 65°W-20°W, que corresponde al dominio empleado por Silva y Carvalho (2007) y Jones y Carvalho (2013) para su estimación de LISAM; b) 5°S-15°S, 70°W-50°W, que corresponde al dominio del sur del Amazonas empleado por Fu et al. (2013) y otros estudios; c) 5°S-15°S, 60°W-50°W, que corresponde al dominio de LISAM sin incluir el nordeste de Brasil; y d) 0-15°S, 50°W-35°W, que corresponde al dominio del nordeste de Brasil. Para efectos de comparación, se tomaron las fechas de inicio, final y duración del SAMS reportadas por Gan et al. (2006) a partir del índice 850ZWI (Índice de viento zonal a 850 hPa), durante el periodo 1979-1997. Este índice se basa en el cambio de dirección del viento zonal, de vientos desde el este en temporada seca a vientos desde el oeste en temporada húmeda (Gan et al. 2004).

Las tendencias en el inicio, finalización y duración de la temporada lluviosa en todos los dominios considerados se determinaron a partir de la prueba no paramétrica Mann-Kendall, para un nivel de significancia del 5%. Adicionalmente, se realizó un análisis de las tendencias del inicio y final de la temporada de lluvias en Suramérica en cada celda de los diferentes dominios a partir de los índices basados en OLR y precipitación, utilizando para este último, datos de precipitación del GPCP. Para este análisis de tendencias en cada celda se utilizó la prueba Paramétrica Lineal, considerando un nivel de significancia estadística del 5%.

### **3 Resultados y Discusión**

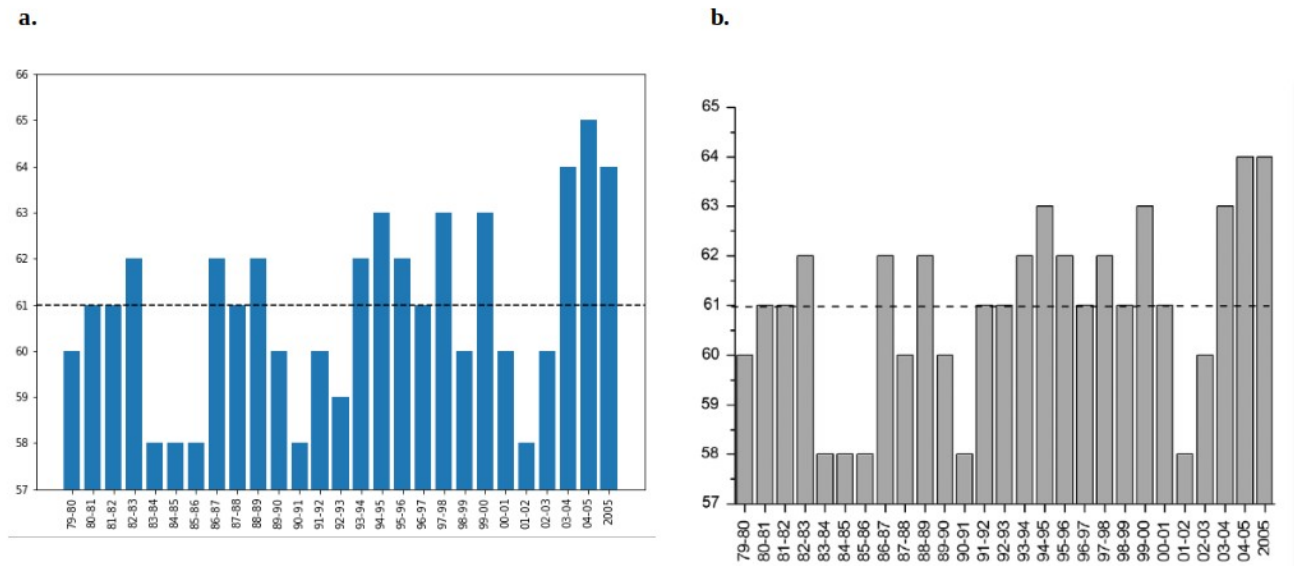
#### *3.1 Estimación del índice LISAM*

Para la estimación del índice LISAM se empleó la metodología planteada por Silva y Carvalho (2007), a partir de datos en pentad (promedio de 5 días) de las cinco variables consideradas en el método (precipitación, viento zonal y meridional, temperatura y humedad específica a 850 hPa,) para el periodo 1979-2005. Las anomalías de los datos se obtuvieron restando la media de largo plazo correspondiente a cada cuadrícula. Nuestras estimaciones indican que el primer modo de variabilidad de esta información (EOFc1) explica el 22% de la varianza explicada, mientras que Silva y Carvalho (2007) identifican un 23% asociado a este modo. En la Fig. 2 se comparan las series de tiempo del inicio del SAMS obtenidas por estos autores frente a nuestros resultados.



**Fig. 1** Dominios espaciales considerados en este estudio: LISAM (*verde*), sur del Amazonas (según Fu et al. (2013); *azul*), LISAM sin nordeste de Brasil (*negro*) y Nordeste de Brasil (*rojo*).

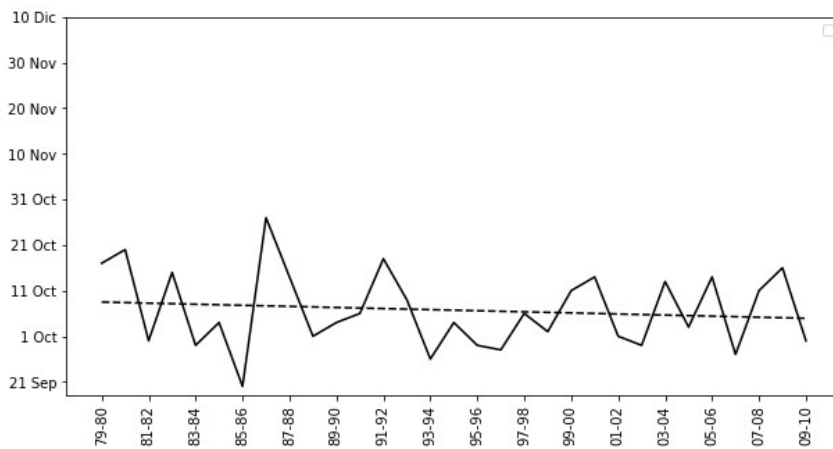
Nuestros resultados indican diferencias en las fechas de inicio del SAMS de uno o dos pentads en algunos años, como es el caso de los años 1987-1988, 2003-2004 y 2004-2005. Sin embargo, durante el periodo 1979-2005 se observa gran concordancia en el comportamiento de las fechas de inicio del SAMS entre nuestros resultados y los de Silva y Carvalho (2007), indicando una reproducción efectiva del índice.



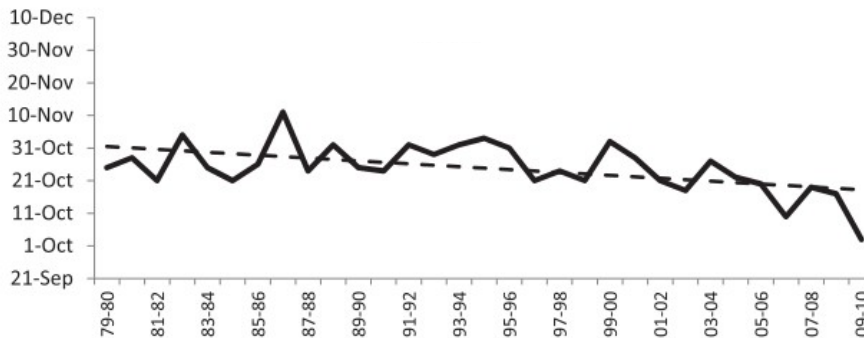
**Fig. 2** Fechas correspondientes al inicio del SAMS obtenidos a partir del índice LISAM propuesto por Silva y Carvalho (2007) a partir de datos promedio cada 5 días durante el periodo 1979-2005. Las fechas se indican en pentada del año (promedio de 5 días). Fechas de inicio obtenidas en este trabajo (a). Fechas de inicio obtenidas por Silva y Carvalho (2007) (b). La línea punteada indica el pentada promedio de inicio.

Jones y Carvalho (2013) emplean el índice LISAM para la caracterización del SAMS durante el período 1979-2010. Sus resultados indican tendencias de inicios tempranos, finales tardíos y mayores duraciones durante este periodo, lo que contradice resultados obtenidos por diversos estudios basados en otro tipos de análisis (Seth et al. 2010; Fu et al. 2013; Arias et al. 2015; Debortoli et al. 2015). Por otro lado, a diferencia de Silva y Carvalho (2007), las estimaciones de Jones y Carvalho (2013) se obtuvieron a partir de anomalías en frecuencia diaria y no cada 5 días. Por tanto, en este trabajo se buscó reproducir el índice LISAM de acuerdo a lo planteado en Jones y Carvalho (2013), buscando corroborar las tendencias identificadas por dichos autores. A partir de nuestros resultados se obtuvo una varianza explicada de 21% en el primer modo de variabilidad, mientras que estos autores identifican un 19.3% de varianza explicada por dicho modo. Aunque los porcentajes de varianza explicada en el primer modo de variabilidad son similares, no fue posible encontrar consistencia entre nuestros resultados y los de Jones y Carvalho (2013). En particular, Jones y Carvalho (2013) identifican cambios en el tiempo del inicio y finalización del SAMS más marcados que los identificados en este trabajo, y adicionalmente, ambas estimaciones presentan diferencias en los meses en que oscilan estas fechas (Fig. 3). Particularmente, mientras que en Jones y Carvalho (2013) el inicio del SAMS incluye fechas entre noviembre y octubre, nuestros resultados indican inicios entre septiembre y octubre. De manera similar, Jones y Carvalho (2013) obtuvieron fechas de finalización del SAMS en mayo, mientras que nuestras fechas se encuentran en su mayoría entre marzo y abril.

**a.**



**b.**



**Fig. 3** Fechas correspondientes al inicio del SAMS durante el periodo 1979-2010 obtenidas a partir del índice LISAM propuesto en Jones y Carvalho (2013), basado en datos diarios. Fechas de inicio estimadas en este trabajo (a). Fechas de inicio obtenidas por Jones y Carvalho (2013) (b). Las líneas punteadas indican la tendencia lineal estimada para cada serie.

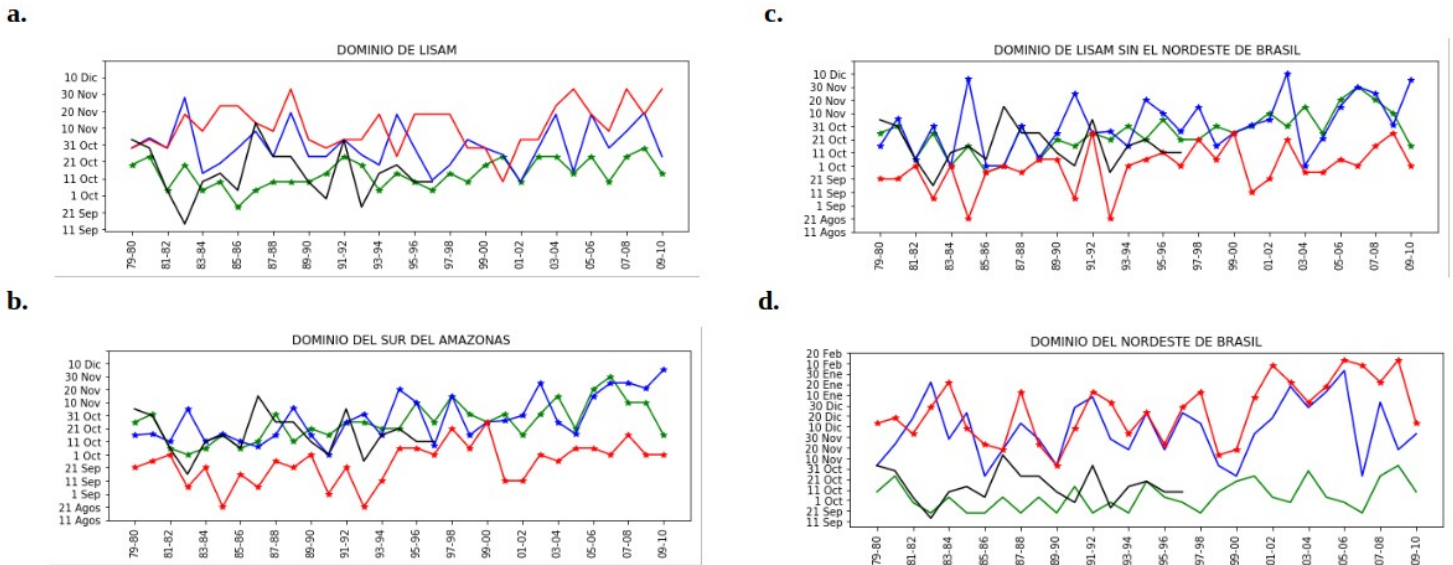


Las diferencias en las varianzas explicadas por cada modo de variabilidad según nuestras estimaciones con respecto a las presentadas en Silva y Carvalho (2007) y Jones y Carvalho (2013) pueden estar relacionadas con diferencias en el procesamiento de los datos previo al cálculo de las componentes principales. Lo anterior puede deberse a que consideraciones, como por ejemplo el número de cifras decimales, no fueron descritas en los trabajos de estos autores, lo que puede generar cambios en los resultados finales. De otro lado, nuestros resultados no presentaron similitudes con aquellos descritos en Jones y Carvalho (2013); por el contrario, nuestros resultados fueron consistentes con las estimaciones presentadas en Silva y Carvalho (2007), que no evidencian una tendencia de inicios tempranos durante el periodo 1979-2005, ni tampoco durante 1979-2010, como se discute en Jones y Carvalho (2013). Esto sugiere que la selección del dominio espacial o la frecuencia temporal de los datos empleados para la estimación del índice LISAM influyen en los resultados obtenidos. Debido a que los datos de precipitación de CPCU, empleados por Jones y Carvalho (2013) para su estimación de LISAM, están disponibles únicamente para el continente, la EOFc fue calculada sobre el área continental del dominio espacial definido por estos autores (recuadro *verde* en la Fig.1). Ya que la información de precipitación empleada no incluye la región oceánica, las estimaciones de las series de tiempo de los modos de variabilidad, y por consiguiente el índice LISAM, se podrían ver afectados, indicando sensibilidad del índice al dominio espacial al que se aplique. Por otro lado, el uso de datos diarios para la estimación de LISAM, como lo presentado por Jones y Carvalho (2013), puede incrementar las variaciones a nivel sinóptico y diurno en el comportamiento de la circulación atmosférica y la precipitación (Horel et al. 1989). En particular, nuestros resultados para la componente principal estimada empleando datos diarios de CPCU exhiben gran variabilidad, generando inicios y finales falsos (varios inicios y finales por año). Lo anterior reafirma las ventajas de usar datos en pentad respecto a usar datos diarios para análisis similares.

### 3.2 Inicio y finalización del SAMS

La Fig. 4 muestra las fechas de inicio de la temporada lluviosa estimadas para los cuatro dominios espaciales considerados en este trabajo (ver Fig. 1) mediante el índice LISAM, el índice basado en precipitación y el índice basado en OLR. Todos los índices se estimaron con datos en pentads y siguiendo las metodologías presentadas en la sección 2. Al estimar estos índices para diferentes regiones podemos identificar la influencia de la variación espacial de los regímenes de precipitación y los diversos procesos que conllevan al inicio de la temporada húmeda dentro del dominio considerado en las estimaciones del inicio, finalización y duración del SAMS.

Las series de tiempo del inicio de la temporada lluviosa muestran la ocurrencia de tendencias crecientes significativas durante el periodo 1979-2010, en especial en los dominios que no incluyen el nordeste de Brasil. Así, se evidencian inicios tardíos del SAMS según lo estimado mediante los tres índices en todos los dominios. Cabe resaltar que el índice 850ZWI, propuesto por Gan et al. (2006), no indica cambios significativos de las fechas de inicio para el monzón de Suramérica, lo que contrasta con lo obtenido con los demás métodos. Sin embargo, al considerar que el periodo de tiempo (1979-1997) y la región (60°W, 10°S-20°S) para los cuales fue calculado este índice particular difieren de los planteados en este estudio, los resultados de este índice no podrían compararse directamente con los obtenidos mediante los otros índices.

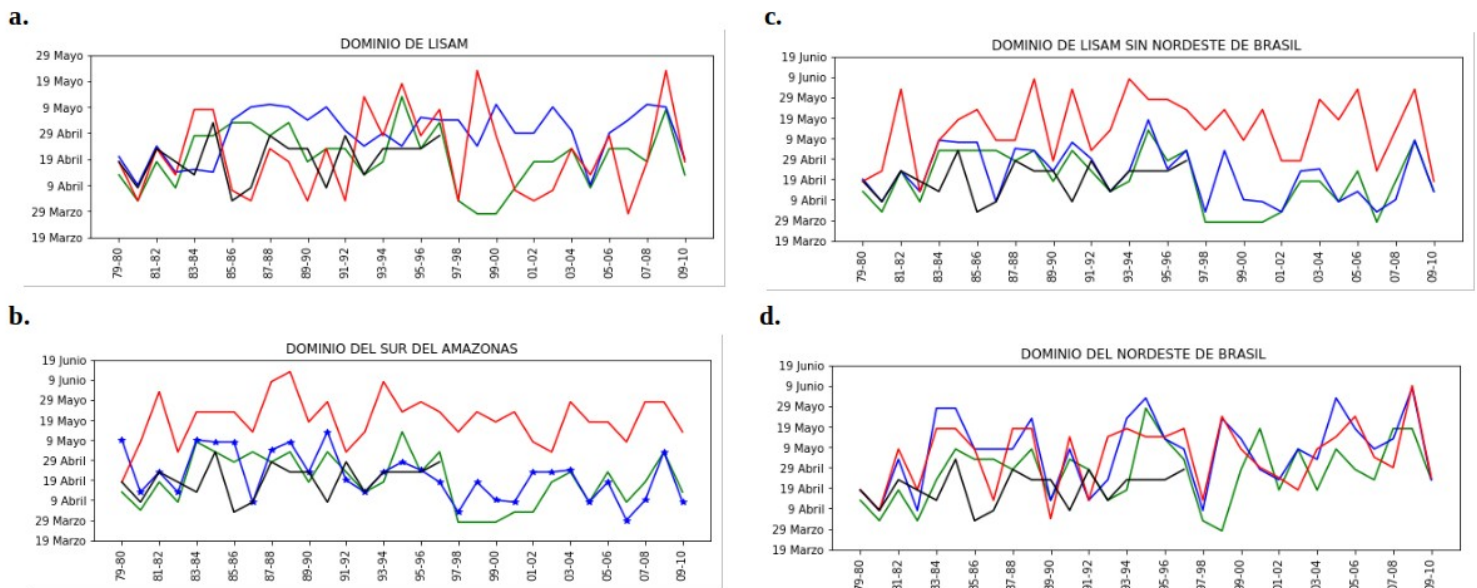


**Fig. 4** Fechas de inicio del SAMS estimadas mediante el índice LISAM (*verde*), el índice basado en precipitación (*azul*), el índice basado en OLR (*rojo*) y el índice 850ZWI (*negro*). Los asteriscos representan tendencias significativas al 5% según la prueba no paramétrica Mann-Kendall.

Estudios anteriores han documentado inicios tardíos en la temporada de lluvias en el Amazonas (ver sección 1). Fu y Li (2004) sugieren que condiciones más secas en el suelo contribuyen a aumentar el índice CIN y a disminuir el índice de energía potencial convectiva disponible (CAPE) durante la temporada de transición de la estación seca a la estación lluviosa, generando un retraso en el inicio de la temporada húmeda. Fu et al. (2013) indican un aumento en la duración de la temporada en el sur del Amazonas debido al retraso de sus fechas de finalización, lo que indica un retraso en el inicio del SAMS. Arias et al. (2015) presentan evidencia de disminución en la duración de los sistemas monzónicos de América, con incrementos en los periodos de transición desde un régimen a otro debido a un retraso en el inicio del SAMS. Por su parte, Boisier et al. (2015), por medio de simulaciones de modelos climáticos globales, describen la expansión de áreas en el Amazonas con una duración de la temporada seca mayor a tres meses, a partir de proyecciones climáticas durante el siglo XXI. De manera similar, numerosos estudios han analizado la influencia de la deforestación en la variabilidad del inicio del SAMS. Dado que la transpiración del bosque tropical facilita la convección y aporta importantes cantidades de vapor de agua a la atmósfera en periodos previos al inicio de la temporada húmeda (Li y Fu 2004; Wright et al. 2017), cambios en la cobertura del suelo disminuyen la cantidad de vapor de agua que se aporta a la atmósfera, afectan las interacciones entre la convección y los procesos en superficie, y alteran el balance de radiación (Da Silva 2004; Wright et al. 2017; Butt et al. 2011; Leite-Filho et al. 2019). Lo anterior resulta en inicios tardíos del SAMS, lo cual se representa correctamente en los índices estimados en este trabajo (Fig. 4).

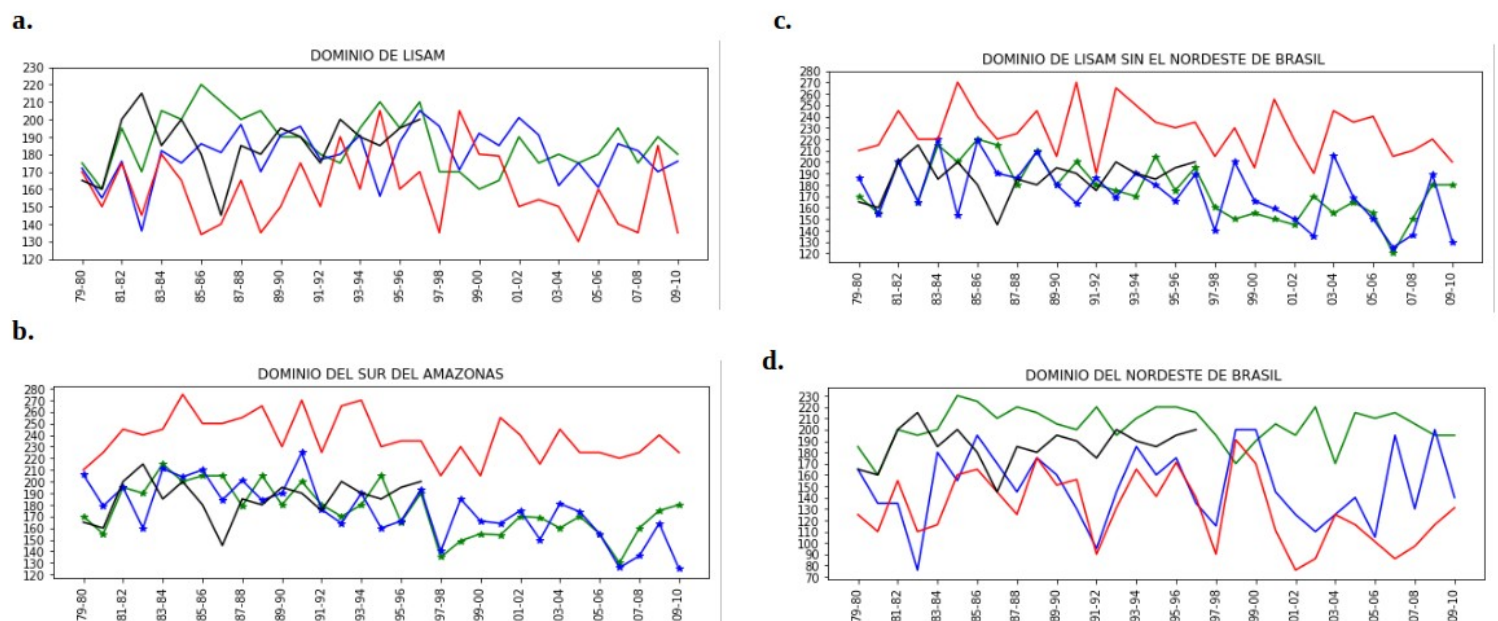
Los tres índices considerados en este trabajo identifican tendencias crecientes significativas para el dominio del sur del Amazonas y el dominio de LISAM sin incluir el nordeste de Brasil, mientras que para los otros dos dominios, no se observan tendencias significativas en el inicio de la temporada lluviosa. Esto sugiere que la caracterización del SAMS presenta diferencias en función de la región que se delimite. En la sección 3.4 se evalúa la influencia del nordeste de Brasil en las estimaciones realizadas por los diferentes índices.

En las Fig. 5 y 6 se presentan las series de tiempo de finalización y duración del monzón de Suramérica estimadas por los tres índices. De manera similar, se incluyen los resultados obtenidos por Gan et al. (2006) a partir del índice 850ZWI. A diferencia del inicio del SAMS, las fechas de finalización no muestran tendencias significativas (tanto crecientes como decrecientes). Sólo se obtuvieron tendencias de finales tempranos según el índice basado en precipitación para el dominio del sur del Amazonas (Fig. 5b).



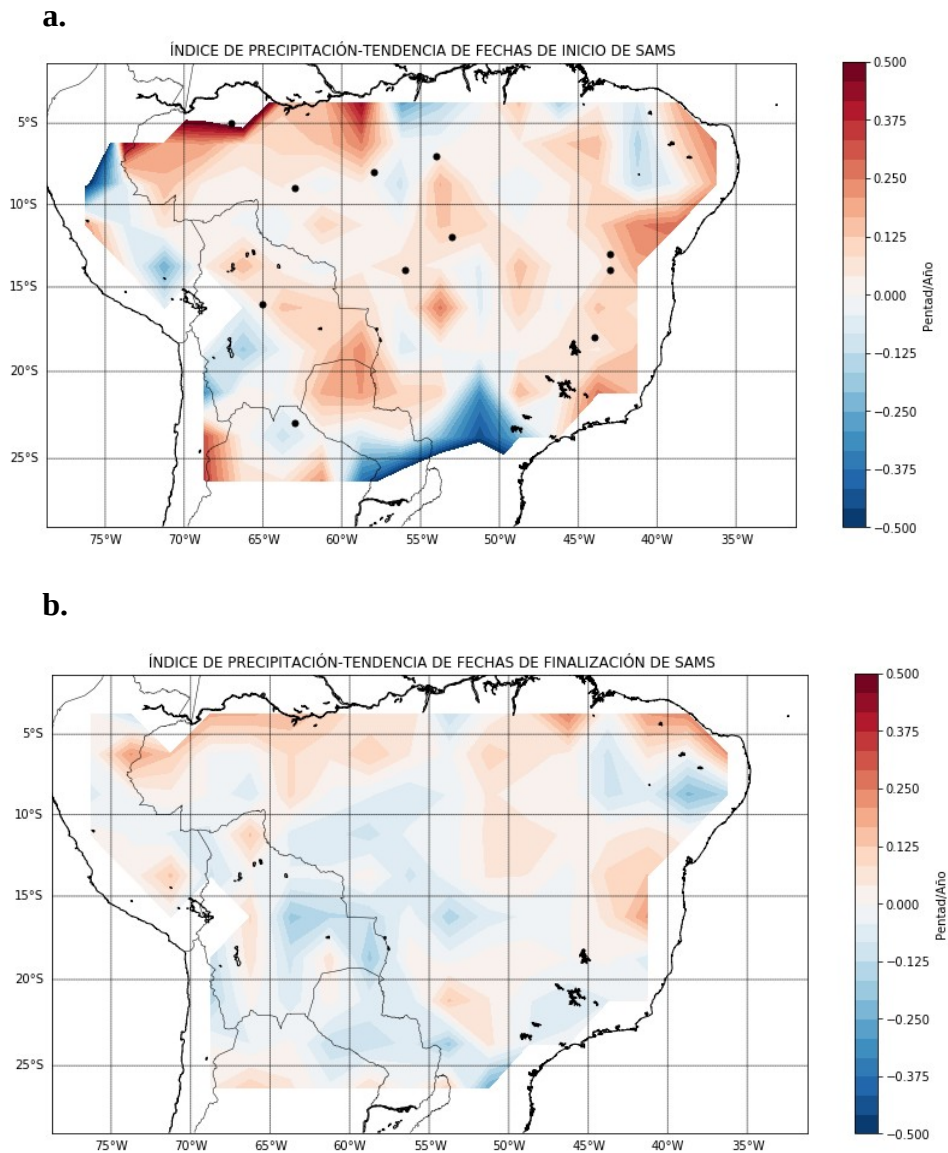
**Fig. 5** Como en la Fig. 4 para las fechas de finalización del SAMS.

Esto indica que la duración de cada temporada de lluvias está fuertemente influenciada por sus fechas de inicio, lo cual se muestra en la Fig. 6 (b y c). En particular, la tendencia de inicios tardíos de la temporada lluviosa obtenida mediante LISAM y el índice basado en precipitación para los dominios del sur del Amazonas y LISAM sin el nordeste de Brasil (Fig. 4b y c), influye en la reducción de la duración de la temporada lluviosa en estos dominios.



**Fig. 6** Como en la Fig. 4 para la duración (en días) del SAMS.

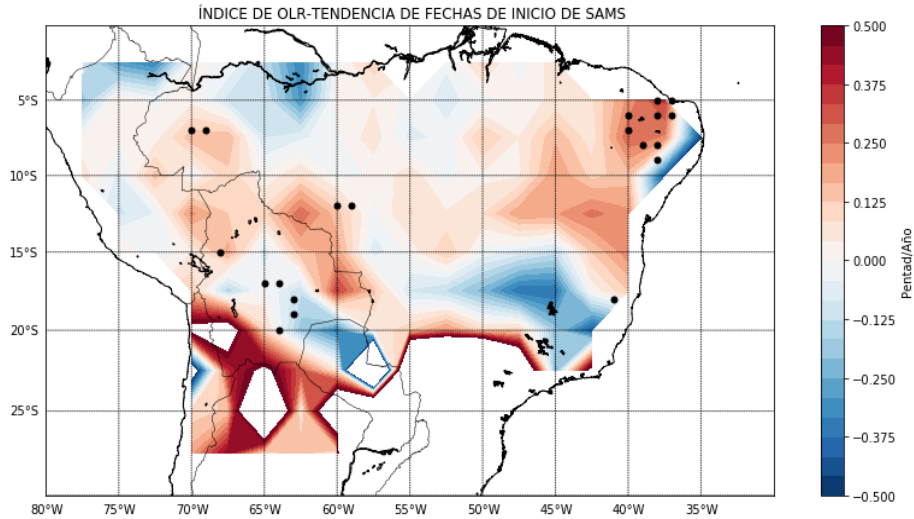
Además, se obtuvieron mapas de tendencias por celda para las fechas de inicio y finalización de la temporada lluviosa en Suramérica, a partir de los índices basados en OLR y en precipitación (Fig. 7). También a nivel de celda se obtienen más tendencias significativas para las fechas de inicio en comparación con las fechas de finalización. En general, ambos métodos sugieren tendencias crecientes en el inicio de la temporada lluviosa en la región de influencia del SAMS de hasta 0.5 pentad/año (25 días/década), manteniendo consistencia con las estimaciones realizadas para los promedios espaciales (Fig.4). Las tendencias estimadas para las fechas de finalización tienen en su mayoría valores entre -0.25 y 0.25 pentad/año, lo que indica cambios menos marcados en las fechas de terminación del SAMS, y a su vez reafirman la influencia de las fechas de inicio sobre la duración de la temporada de lluvias en esta región.



**Fig. 7** Tendencias en las fechas de inicio y finalización del SAMS obtenidas a partir del índice basado en precipitación (a, b) y el índice basado en OLR (c, d). En las Fig. 7a y 7c, los puntos negros indican cuadrículas con tendencias significativas al 5% de acuerdo con la prueba Paramétrica Lineal.

Por otro lado, los finales tempranos representados a partir de índice de precipitación en el dominio del sur del Amazonas (Fig. 5b) son consistentes con lo sugerido en Debortoli et al. (2015), quienes obtienen tendencias de finales tempranos para los estados de Mato Grosso y Rondonia en Brasil, ubicados al sur de la región considerada en este estudio. La Fig. 8 muestra que estos dos estados están ubicados dentro del dominio del sur del Amazonas (según lo definido por Fu et al. (2013)), por lo que, a pesar de la diferencia entre los índices empleados, los resultados subieren una representación de los patrones de precipitación en la zona y sus cambios en el tiempo consistentes con otros estudios.

c.



d.

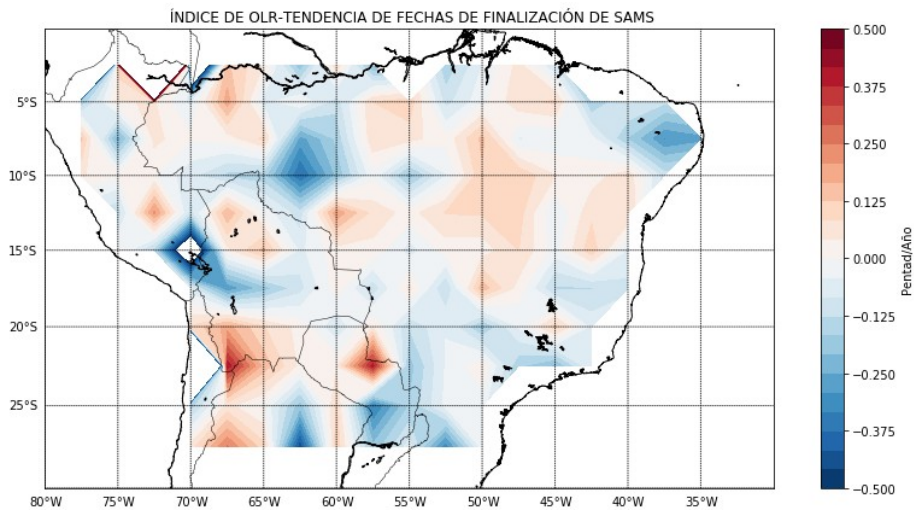
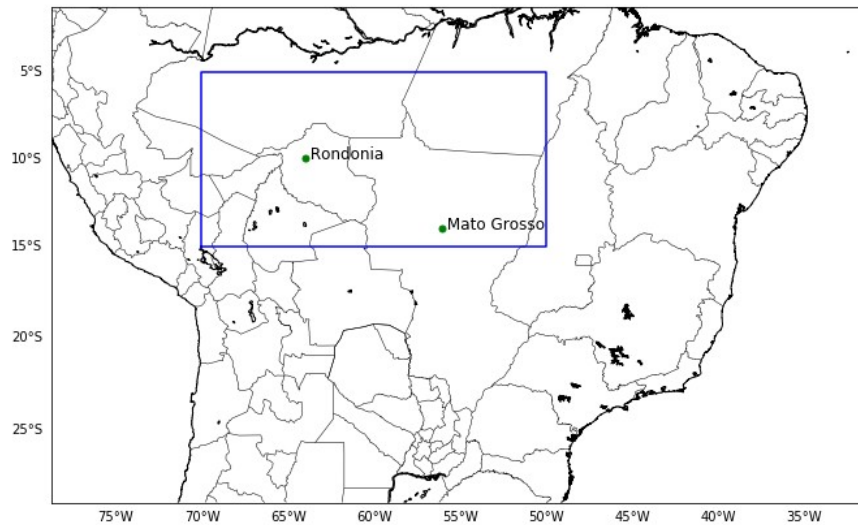


Fig. 7 (Continuación)

### 3.3 Evolución de la circulación atmosférica durante el inicio y la finalización del SAMS

El inicio de la temporada de lluvias en el Amazonas comienza por un cambio en los regímenes de los vientos, pasando de vientos desde el sur a vientos provenientes del norte (Wang y Fu 2002; Vera et al. 2006). Durante la primavera austral, las zonas de convección intensa pasan de estar en el noroeste de Suramérica a desplazarse hacia el sur (Marengo et al. 2012), formando la SACZ durante el verano

austral, que corresponde a una banda de nubosidad y precipitación que se extiende del noroeste hasta el sureste del continente, y que es una característica predominante de la circulación monzónica en Suramérica (SACZ; Vera et al. 2006). El Alta de Bolivia se desarrolla en la alta troposfera al inicio del SAMS, cuyo establecimiento ha sido relacionado con la transición de los vientos desde el sur a vientos desde el norte, y su mantenimiento en el oeste del continente se atribuye al fortalecimiento de la convección en superficie y a la persistencia de los vientos desde el norte (Horel et al. 1989; Wang y Fu 2002).



**Fig. 8** Ubicación de los Estados de Mato Grosso y Rondonia en Brasil. El recuadro azul representa el dominio del sur del Amazonas, según se define en Fu et al. (2013).

Hacia el final del SAMS, el centro de mayor actividad convectiva, situado en el sur del Amazonas y en el centro de Brasil, migra hacia el norte (Vera et al. 2006; Arias et al. 2015), del mismo modo que se genera el cambio en la dirección del flujo trans-ecuatorial, debilitándose los vientos desde el norte y aumentando la frecuencia de los vientos desde el sur (Wang y Fu 2002; Li y Fu 2004). En la alta troposfera, la circulación anticiclónica se debilita y prevalecen las corrientes del oeste (Horel et al. 1989), indicando la transición del régimen del SAMS a la circulación monzónica en América del Norte.

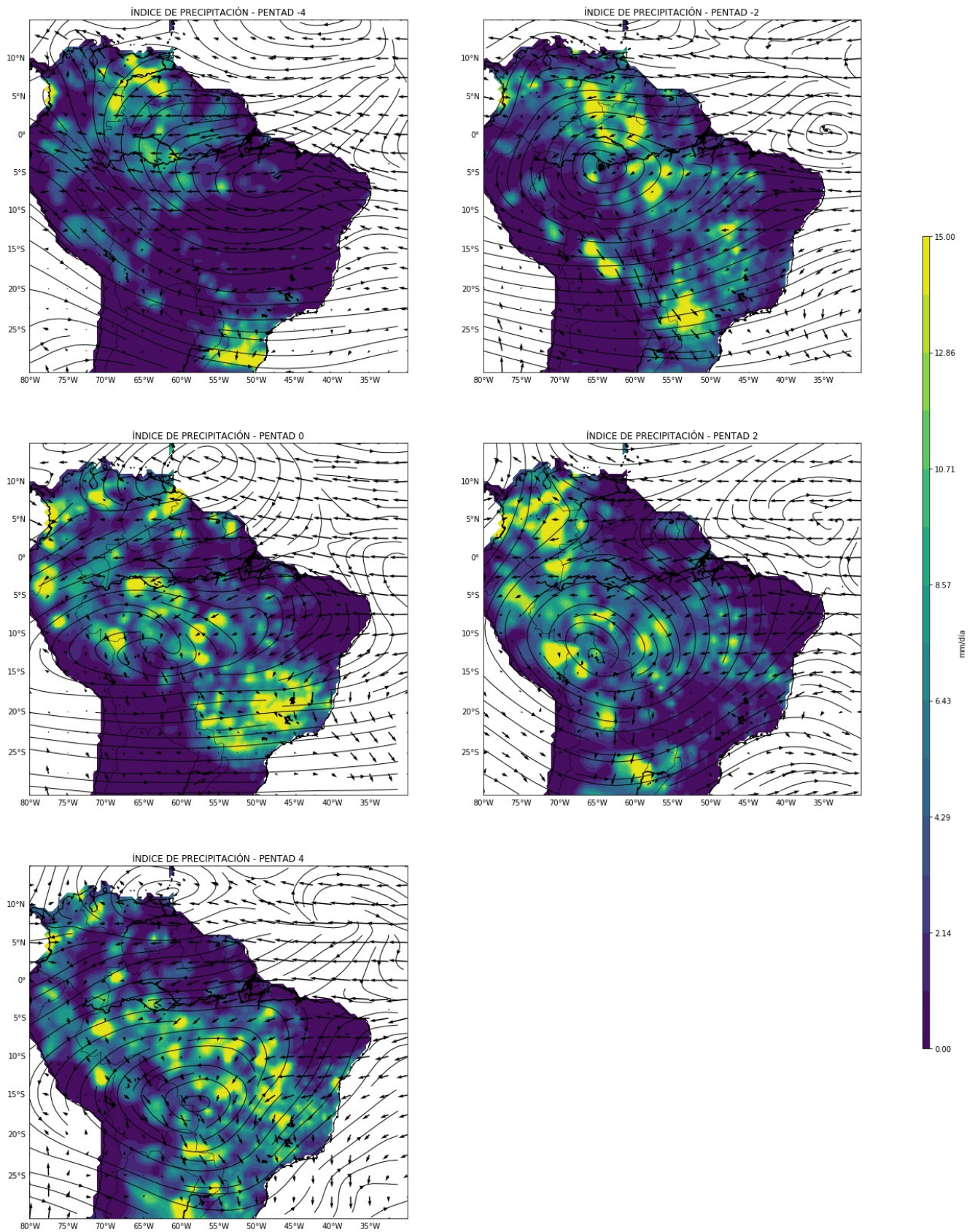
Para verificar si los índices empleados reproducen adecuadamente esta evolución del SAMS, las Figs. 9 a 14 presentan la evolución del inicio y finalización del SAMS según las fechas estimadas por los índices de precipitación (Fig. 9 y 12), OLR (Fig. 10 y 13) y LISAM (Fig. 11 y 14). Dichos mapas fueron obtenidos como el promedio de los campos de precipitación y vientos en superficie (850 hPa) y en la alta troposfera (200 hPa) correspondientes al pentad de inicio o de finalización determinados para cada año por los diferentes métodos al considerar el dominio del sur del Amazonas. El pentad 0 corresponde al inicio/finalización del SAMS. Los pentads -4 y -2 corresponden a 10 y 5 días antes del inicio/finalización del monzón, mientras que los pentads 2 y 4 representan los campos de las variables 5 y 10 días después del inicio/finalización del SAMS.

Para el inicio del SAMS, se observa que todos los índices representan la ocurrencia de precipitación extendida desde el norte hacia el sureste del continente, indicando el desplazamiento de la convección hacia el sur y la formación de la SACZ. Un desplazamiento más claro de la precipitación se observa a partir del índice basado en precipitación y del índice LISAM, evidenciando mayores intensidades de precipitación 10 días después del inicio del SAMS, principalmente en la región del sur del Amazonas y el centro de Brasil. De manera similar, los vientos en superficie muestran un régimen desde el norte, característico del verano austral. Vientos fortalecidos (principalmente antes del pentad 0) se observan en el este de la cordillera de Los Andes, cerca de los  $18^{\circ}\text{S}$ - $63^{\circ}\text{W}$ , zona en la cual ocurre el Jet de Bajo Nivel de Suramérica, que transporta humedad desde el Amazonas hasta la cuenca de La Plata (Vera et al. 2006). Las mayores diferencias se observan en la circulación en la alta troposfera. De los tres métodos, el índice basado en precipitación identifica la formación del Alta de Bolivia desde 5 días antes del inicio del SAMS y hasta 10 días después del inicio. En el índice basado en OLR, el anticiclón se forma 5 días después del inicio, lo cual es consistente con las fechas de inicio más tempranas obtenidas con este método (Fig. 4b), en comparación con las obtenidas con los demás índices. Para LISAM, aunque el anticiclón se observa a partir del pentad 2 respecto al inicio del SAMS, la circulación se ve debilitada 5 días después.

Los tres métodos representan la migración de la precipitación desde el sur hacia el norte del continente, así como una disminución de la precipitación en el sur del Amazonas y el centro de Brasil durante la fase de finalización del SAMS. En particular, LISAM y el índice basado en precipitación muestran que a medida que la precipitación se desplaza hacia el norte, dicho desplazamiento coincide con la temporada de lluvias en la región del nordeste de Brasil, representándose mejor con el índice basado en precipitación. El debilitamiento de los vientos en superficie y el consecuente cambio del régimen de vientos desde el norte a vientos desde el sur se observa en todos los campos, principalmente a partir del pentad 2 después de la finalización del SAMS. Por otro lado, la circulación a 200 hPa, de manera similar al inicio, exhibe las mayores diferencias entre los índices, sugiriendo ciertas limitaciones de los métodos para representar el comportamiento del SAMS en la alta troposfera. El índice basado en precipitación muestra el debilitamiento y desaparición del anticiclón a partir del final del monzón, mientras que LISAM no presenta la evolución del Alta de Bolivia durante los pentads considerados en la Fig. 14.

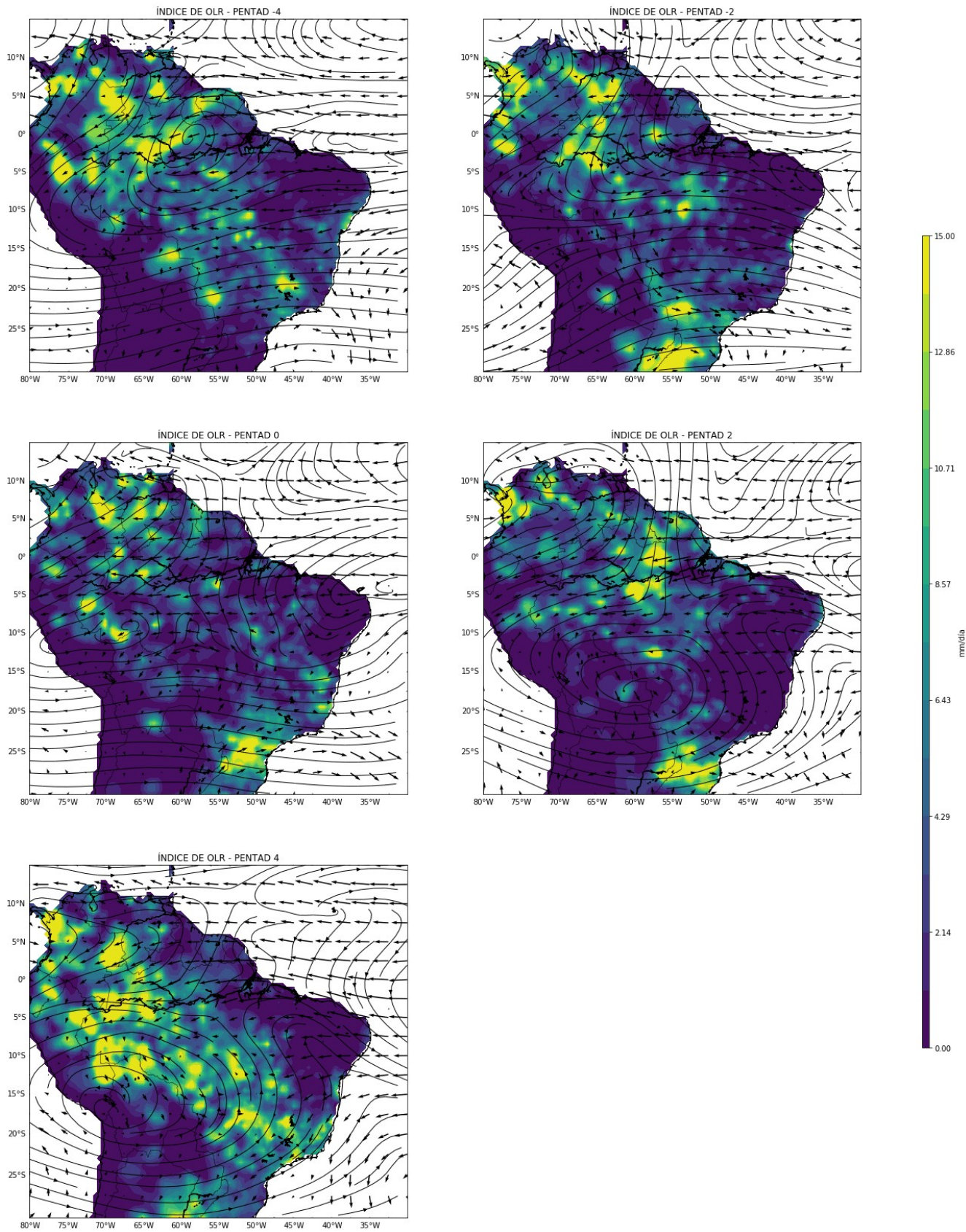
### *3.4 Influencia del Nordeste de Brasil en las estimaciones de inicio y finalización del SAMS*

Las Figs. 4a y 4d muestran las series de tiempo para el inicio de la temporada lluviosa en los dominios de LISAM y del nordeste de Brasil. En particular, se observan tendencias significativas sólo para uno de los tres índices reproducidos. Esto contrasta con las estimaciones en los dominios que no incluyen el nordeste de Brasil, en los cuales los tres métodos indican tendencias significativas, principalmente de inicios tardíos en el SAMS. Lo anterior sugiere que incluir la región del nordeste de Brasil en la caracterización del SAMS influye en las estimaciones realizadas.

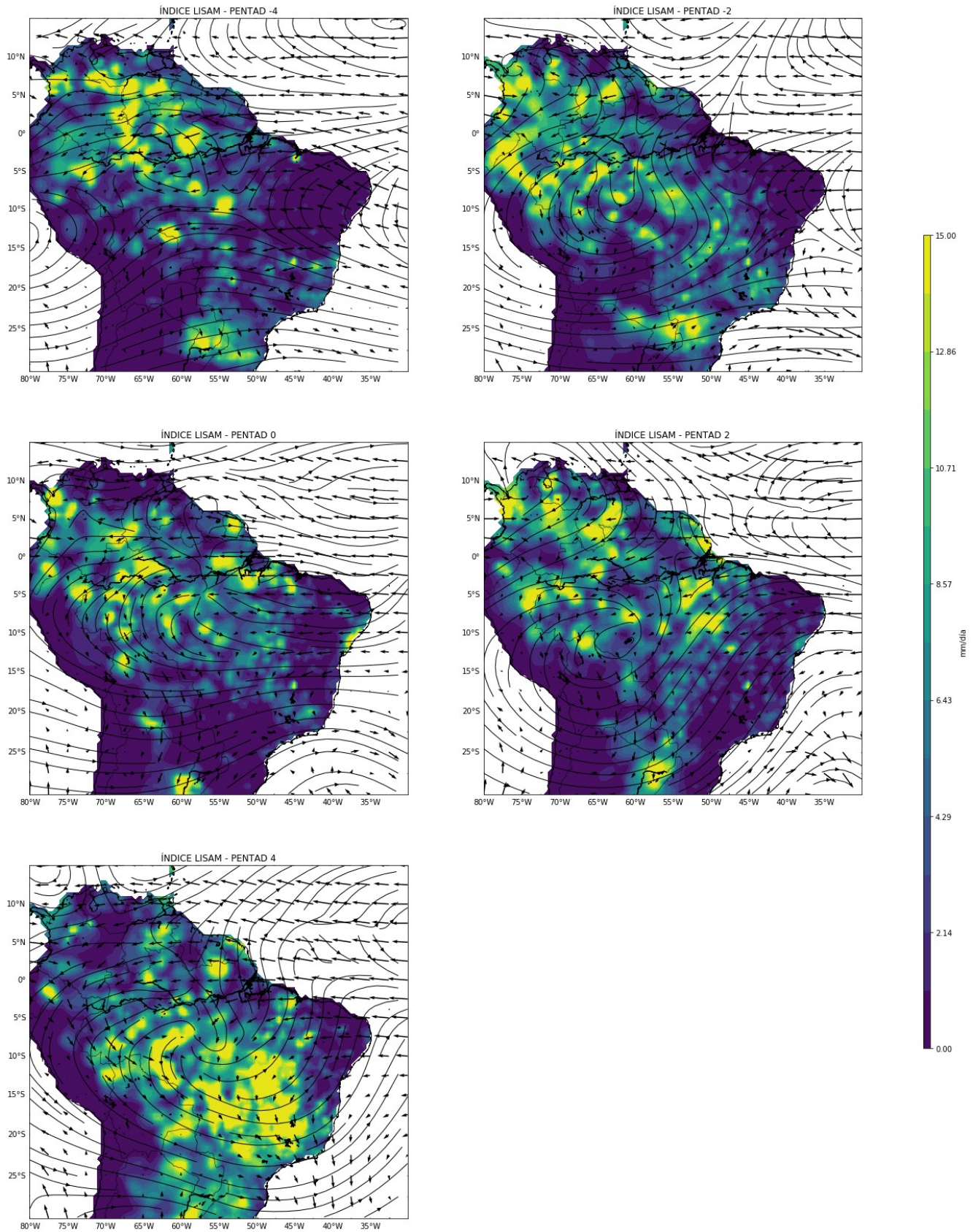


**Fig. 9** Evolución de la circulación atmosférica en Suramérica antes y después del inicio del SAMS, según las fechas definidas a partir del índice basado en precipitación. Los vectores representan la circulación del viento a 850 hPa. Las líneas de corriente representan la circulación del viento a 200 hPa. La barra de color indica intensidad de precipitación (en mm/día). Pentad 0 representa la fecha de inicio del SAMS. Pentads -2 y -4 (2 y 4) significan 2 y 4 pentads antes (después) del inicio del SAMS.

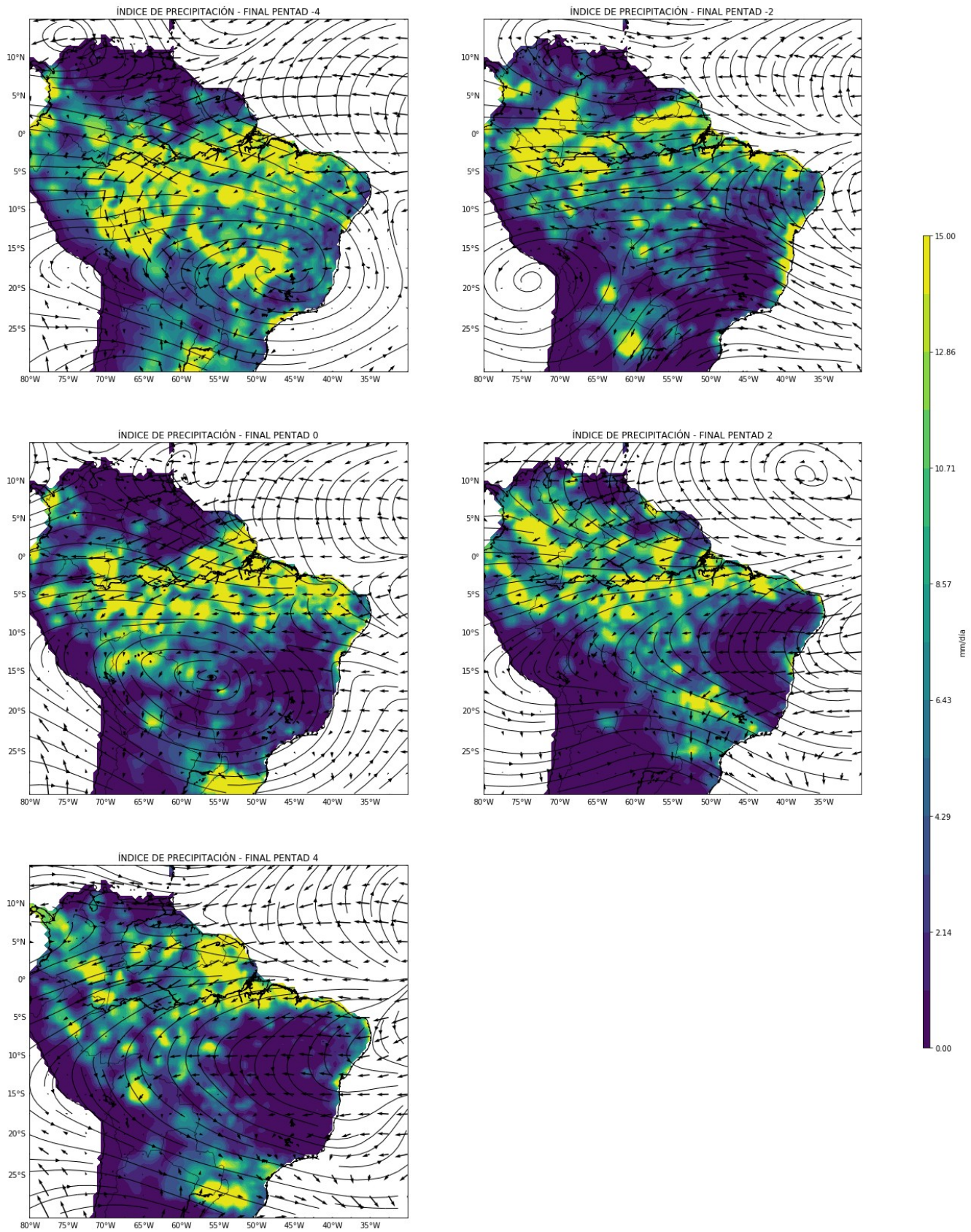




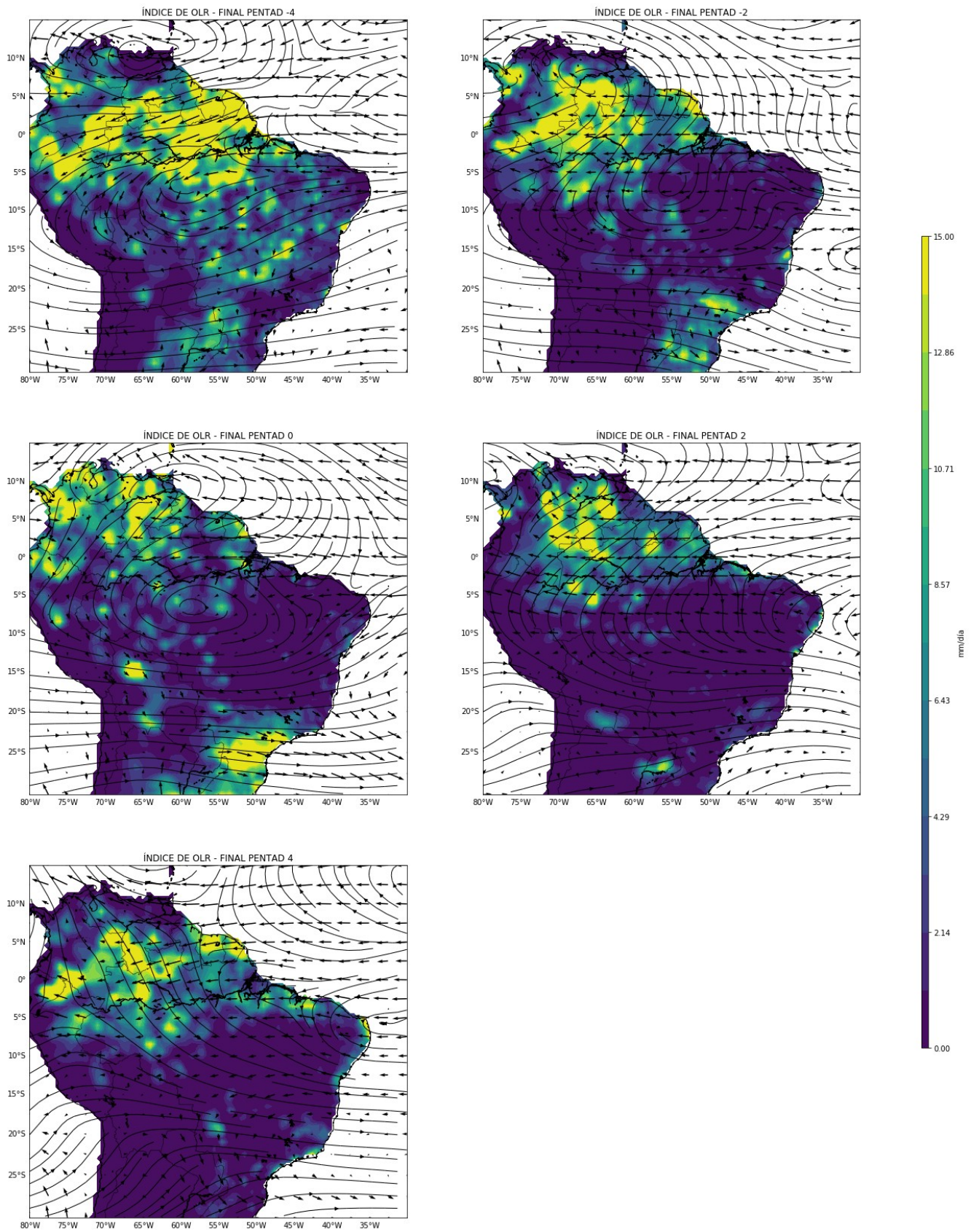
**Fig. 10** Como en la Fig. 9 para el índice basado en OLR.



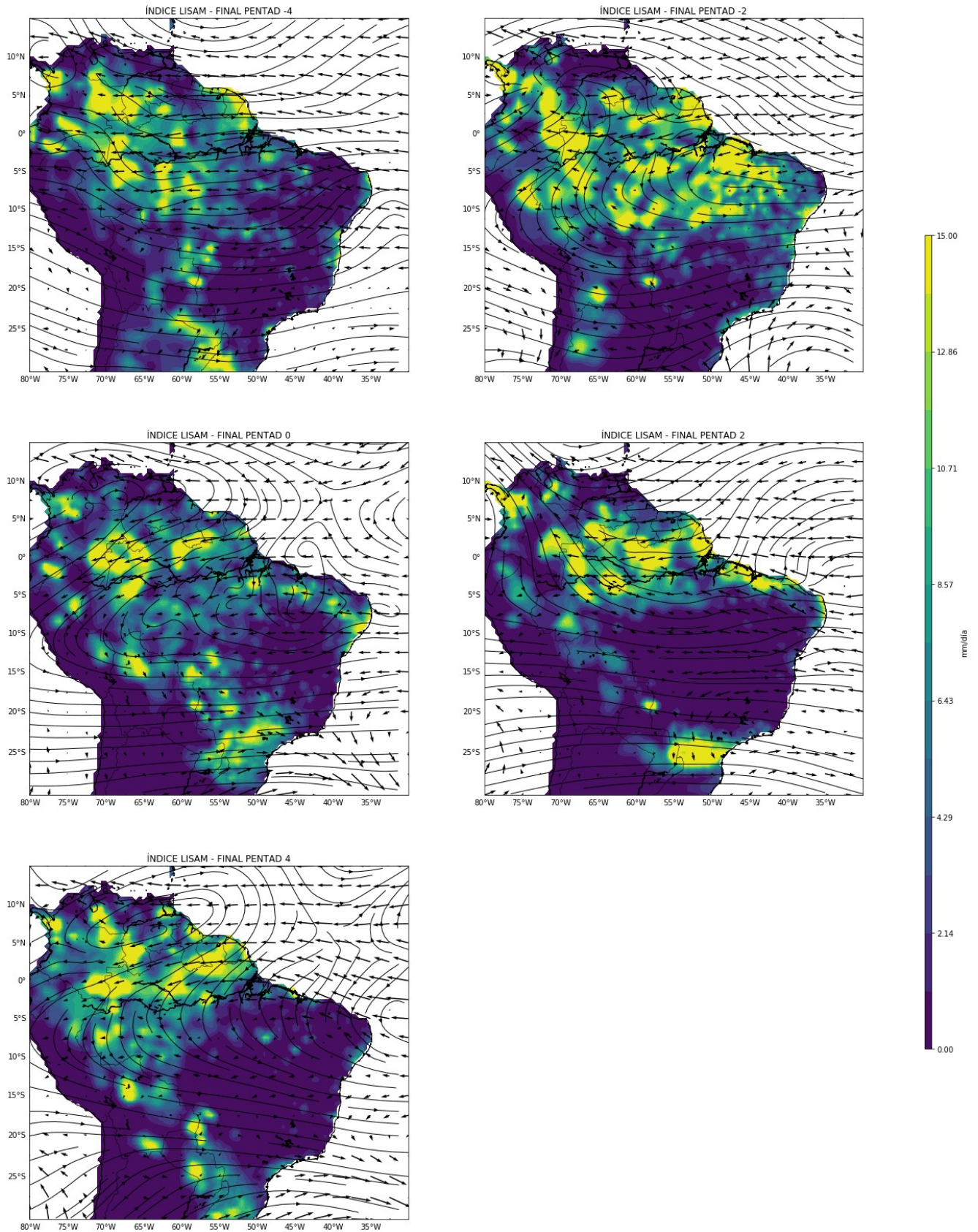
**Fig. 11** Como en la Fig. 9 para el índice LISAM.



**Fig. 12** Evolución de la circulación atmosférica en Suramérica antes y después de la finalización del SAMS, según las fechas definidas a partir del índice basado en precipitación. Los vectores representan la circulación del viento a 850 hPa. Las líneas de corriente representan la circulación del viento a 200 hPa. La barra de color indica intensidad de precipitación (en mm/día). Pentad 0 representa la fecha de finalización del SAMS. Pentads -2 y -4 (2 y 4) significan 2 y 4 pentads antes (después) de la finalización del SAMS.



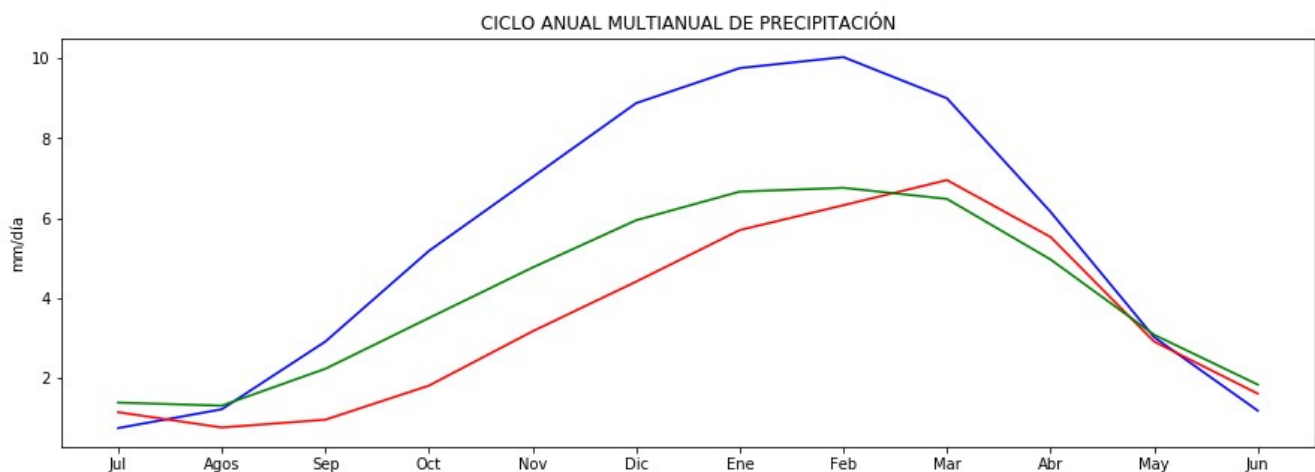
**Fig. 13** Como en la Fig. 12 para el índice basado en OLR.



**Fig. 14** Como en la Fig. 12 para el índice LISAM.

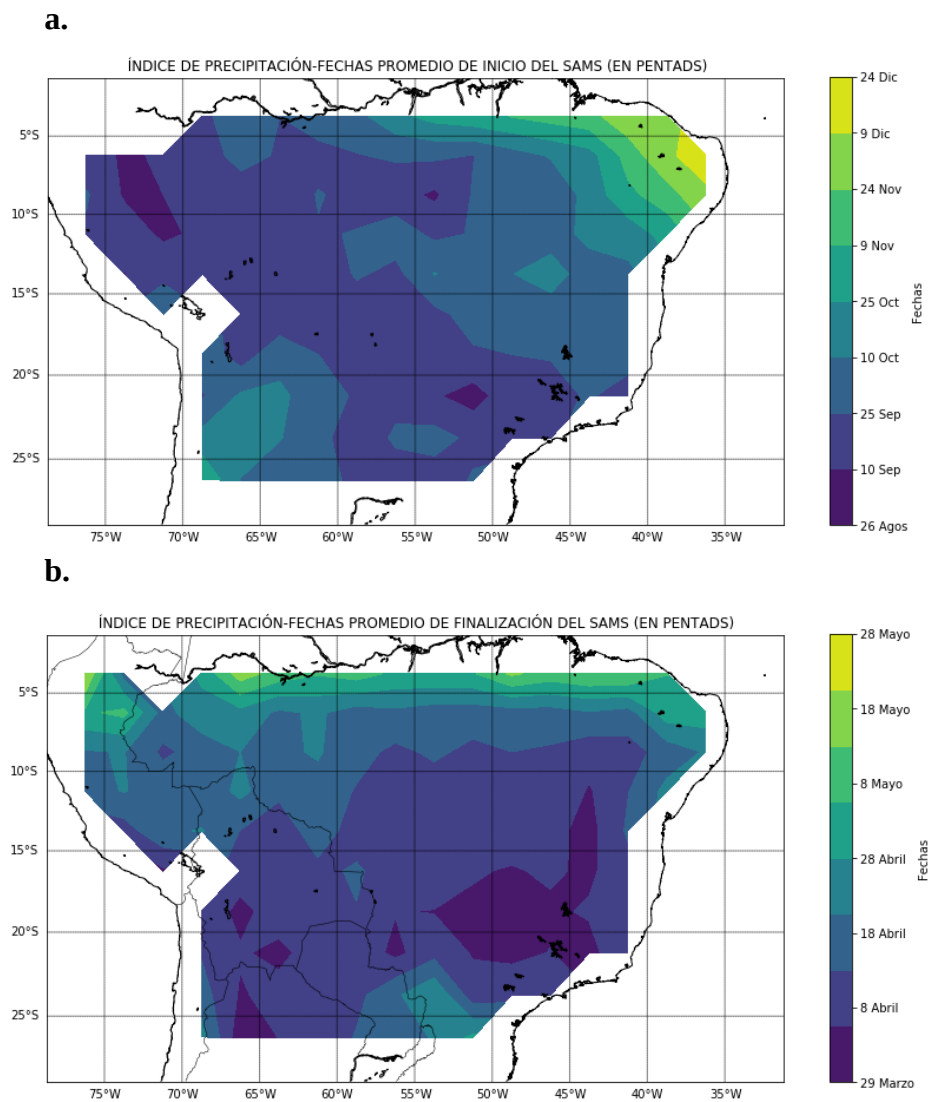
Múltiples estudios han analizado la temporada húmeda en el nordeste de Brasil, atribuyendo a varios procesos las condiciones que favorecen el inicio de la precipitación en la región. Utida et al. (2019) sugieren que la activación de la precipitación en la zona norte del nordeste de Brasil se debe al desplazamiento al sur de la Zona de Convergencia Intertropical, el cual es máximo entre marzo y mayo (otoño austral), mientras que en la costa este de la región, la precipitación parece estar más influenciada por la brisa de mar y por las ondas del este que se fortalecen por los vientos alisios en junio-julio-agosto. Ramos (1975) indica que la región del nordeste de Brasil está fuertemente dominada por una subsidencia de bajo-medio nivel, que facilita la precipitación cuando dicha subsidencia se debilita o no ocurre. Por su parte, da Silva (2004) atribuye la estabilidad de la región a la rama descendente de la celda de Walker, la cual inhibe procesos de gran escala en la zona, por lo que la precipitación en la misma se debe a alteraciones que ocurren desde el este de la región y que desestabilizan la atmósfera.

Adicional a esto, la variabilidad de las SST del Atlántico Tropical sur ha sido relacionada con los regímenes de precipitación en la zona. Lucena et al. (2011) indican que un gradiente meridional de la temperatura superficial del mar negativo, asociado a subsidencia en el Atlántico tropical norte y anomalías positivas de SST en el sur, genera mayor precipitación en el nordeste de Brasil. Por su parte, Wang y Fu (2002) indican que la temporada húmeda en el este del Amazonas, la cual presenta su pico de precipitación en el otoño austral, es influenciada tanto por el océano Pacífico como por el Atlántico. De los resultados obtenidos en este trabajo se observa que, en general, existe acuerdo entre los diferentes índices en cuanto a que la temporada de lluvias en el nordeste de Brasil se da por procesos diferentes a los del SAMS (ver sección 3.2), y que los periodos en los que se presentan los picos de precipitación en la región monzónica (sur del Amazonas y centro de Brasil) y en el nordeste de Brasil son diferentes. La Fig. 15 muestra el ciclo anual multianual de precipitación para los dominios de LISAM, el sur del Amazonas y el nordeste de Brasil. Para el dominio del sur del Amazonas y de LISAM, el pico de precipitación se da en el verano austral (diciembre-enero-febrero); sin embargo, la diferencia en los ciclos anuales de estos dos dominios radica en los niveles de precipitación, siendo menores en el dominio de LISAM. Para la región del nordeste de Brasil, tanto los valores como la temporada en la que ocurre el pico de precipitación muestran regímenes diferentes. El nordeste de Brasil exhibe patrones de precipitación diferentes a los de una región de monzón típica, con un periodo de mayor precipitación entre febrero y abril, con intensidades máximas aproximadas de 6 mm/día.

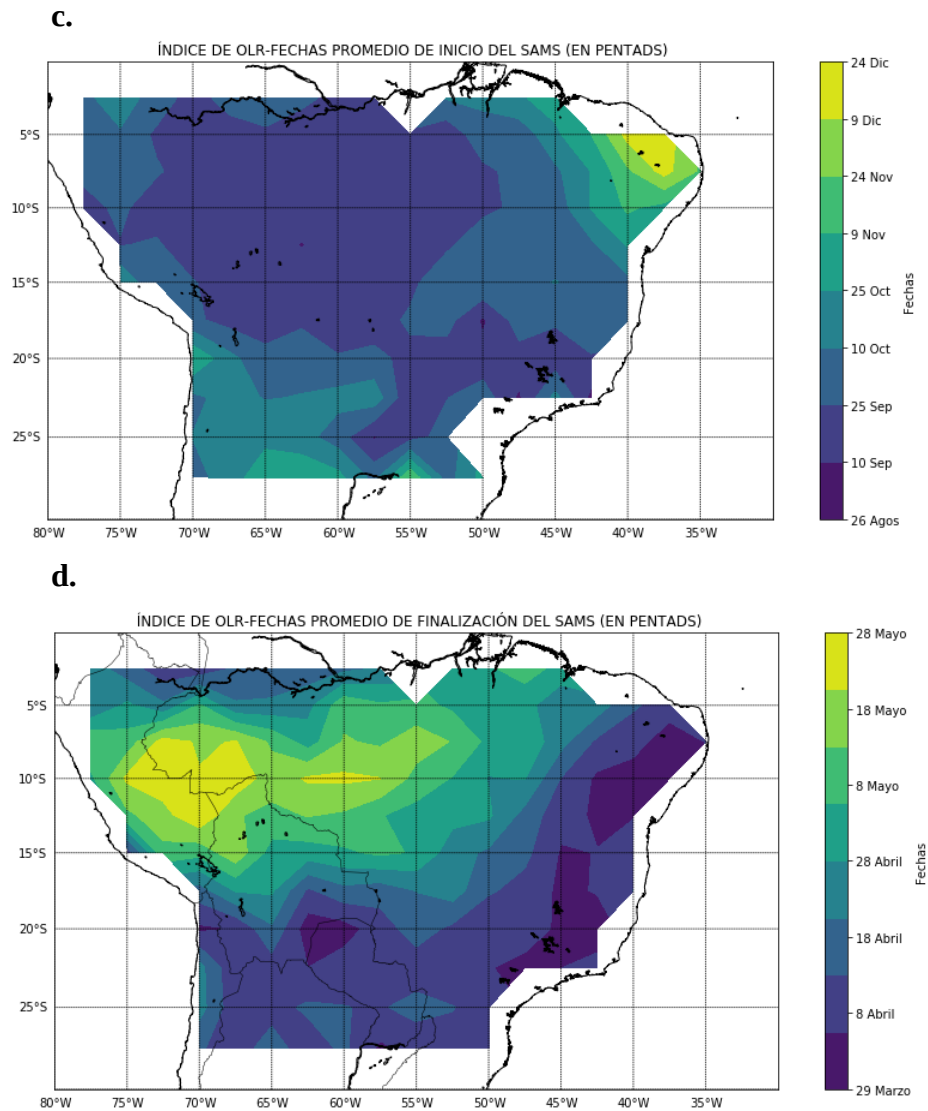


**Fig. 15** Ciclo anual multianual de precipitación para el dominio del sur del Amazonas (*azul*), LISAM (*verde*) y el nordeste de Brasil (*rojo*).

La Fig. 16 muestra la distribución de las fechas promedio de inicio y finalización de la temporada de lluvias en Suramérica obtenidas a partir del índice basado en precipitación y el basado en OLR. A diferencia de la región del centro de Suramérica, cuya temporada húmeda comienza en general entre los pentads 50 y 60 (inicios de septiembre y finales de octubre), la región del noreste de Brasil exhibe inicios de su temporada lluviosa para finales de año y comienzos del siguiente (pentad 72). Para la finalización de la temporada de lluvias sobre el noreste de Brasil no se encontró consistencia en los resultados de estos índices, lo cual se atribuye a diferencias en los métodos dados a partir de las variables en las que se basan: mientras que el índice de precipitación utiliza datos de pluviómetros en superficie, el método de OLR se basa en radiación de onda larga saliente en el tope de la atmósfera, la cual es fuertemente influenciada por la nubosidad generada por la actividad convectiva.



**Fig. 16** Fechas promedio (en pentads) de inicio y finalización del SAMS estimadas a partir del índice basado en precipitación (*a* y *b*) y del índice basado en OLR (*c* y *d*).



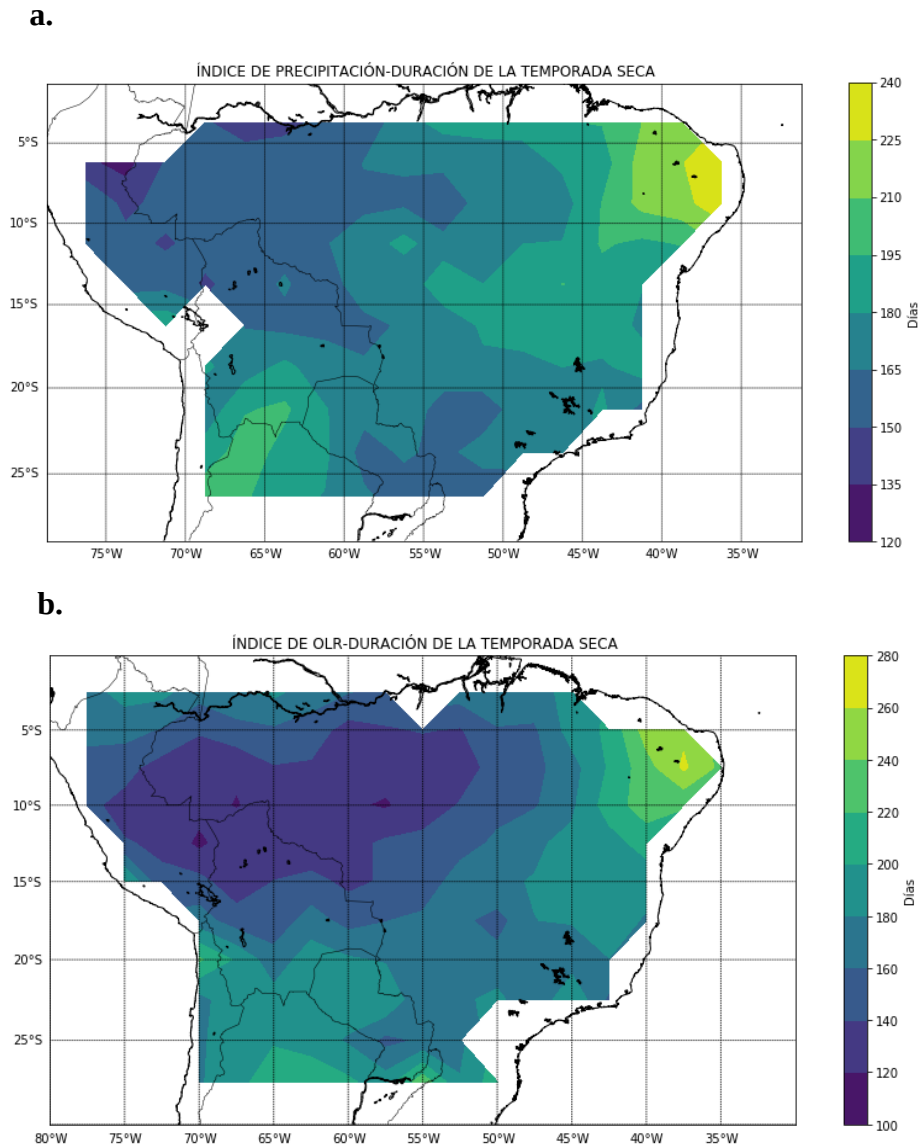
**Fig. 16** (Continuación)

La duración de la temporada seca para Suramérica estimada a partir de los índices de precipitación y OLR (Fig. 17) muestra duraciones máximas en el noreste de Brasil. Estos resultados son consistentes con los planteados por Wang y Fu (2002), que indican una menor variabilidad en los niveles de precipitación en el oeste del Amazonas con respecto a la zona este, caracterizando esta última zona como una región predominantemente seca a lo largo del año, a excepción del otoño austral cuando se dan los picos de precipitación por el desplazamiento hacia el norte de los centros de máxima convección.

Estas diferencias sugieren que al incluir el noreste de Brasil se afecta la caracterización realizada sobre el monzón debido a diferencias en las duraciones de la temporada seca en la región del noreste de Brasil respecto a la región donde se desarrolla la SACZ. La SACZ ha sido reconocida como una característica de la fase madura del SAMS (Gan et al. 2004; Vera et al. 2006; Carvalho et al. 2011; Marengo et al. 2012), la cual, al asociarse con una zona de convergencia de vientos y humedad en superficie, genera altos valores de precipitación durante el verano austral. La duración máxima de la



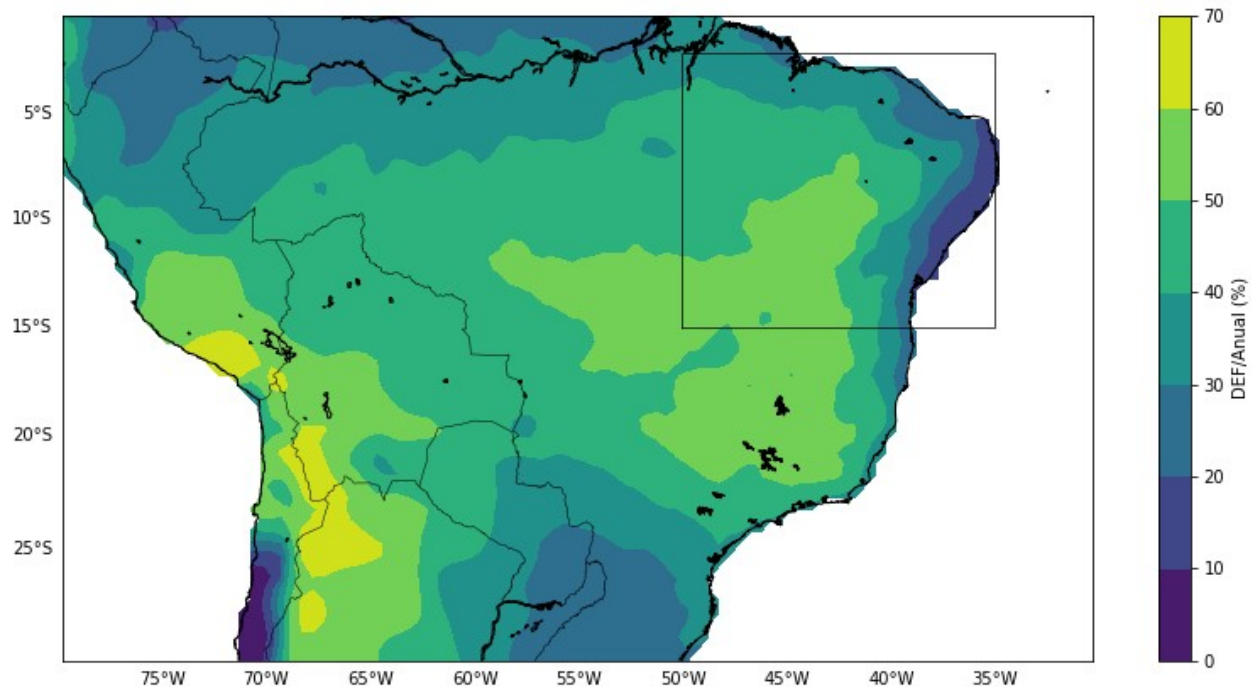
temporada seca a lo largo de esta banda de convergencia oscila alrededor de 195 días (39 pentads), según lo estimado a partir de los índices basados en precipitación y OLR, lo que contrasta con los más de 225 días (45 pentads) de duración de la temporada seca en la región del noreste de Brasil.



**Fig. 17** Duración (en días) de la temporada seca en Suramérica estimada a partir del índice de precipitación (a) y el índice de OLR (b).

Por otro lado, uno de los aspectos por los que se caracteriza el SAMS es la ocurrencia de un alto porcentaje de precipitación en verano respecto al total anual, con valores correspondientes aproximadamente al 50% de la precipitación total anual en la región (Gan et al. 2004; Silva y Carvalho 2007; Marengo et al. 2012; Arias et al. 2015). A partir de la Fig. 18, que representa el porcentaje de la precipitación en el verano austral (durante la fase madura del SAMS) con respecto a la precipitación total anual, se obtiene que el porcentaje de precipitación ocurrida en verano respecto al total anual en parte de la región del noreste de Brasil no presenta valores mayores al 50%.

Lo anterior sugiere una sensibilidad de los índices respecto al dominio espacial que se determine, pues al incluir regiones con regímenes de precipitación distintos o que no exhiban las características de una circulación de monzón, se alteran las estimaciones del inicio y finalización del SAMS.



**Fig. 18** Porcentaje de la precipitación ocurrida en el verano austral (fase madura del SAMS) respecto a la precipitación total anual. El recuadro *negro* indica el dominio del nordeste de Brasil considerado en este estudio.

#### 4 Resumen y Conclusiones

Este estudio presenta un análisis de diversos índices para la estimación del inicio y finalización del Monzón de Suramérica entre 1979 y 2010. Para ello, se consideró el uso de índices basados en precipitación, en Radiación de Onda Larga (OLR) y en Funciones Ortogonales Empíricas combinadas (LISAM) para 4 dominios diferentes en la región del monzón de Suramérica (SAMS). Nuestros resultados sugieren acuerdos en las tendencias de un retraso del inicio del SAMS, mientras que no se encontraron comportamientos significativos en sus fechas de finalización, indicando que la duración de la temporada de lluvias en el sur del Amazonas y el centro de Brasil está fuertemente influenciada por sus fechas de inicio. Lo anterior es consistente con lo reportado en múltiples estudios basados en diferentes tipos de observaciones (Seth et al. 2010; Fu et al. 2013; Arias et al. 2015; Debortoli et al. 2015).

Nuestra evaluación de los inicios tempranos y finales tardíos estimados a partir del índice LISAM sugiere dificultades y limitaciones en la metodología para la obtención de este índice que impidieron la identificación de tendencias similares a las obtenidas por estudios anteriores basados en este índice (Jones y Carvalho 2013). En particular, Jones y Carvalho (2013) emplean datos diarios entre 1979 y 2010 para la obtención de LISAM, encontrando una tendencia a inicios más tempranos del SAMS, en oposición a lo identificado por múltiples estudios (Seth et al. 2010; Fu et al. 2013; Arias et al. 2015;

Debortoli et al. 2015). Por el contrario, en este trabajo se logró una reproducción exitosa del método aplicado en otro estudio anterior para la obtención de LISAM (Silva y Carvalho 2007), para el cual se identifica un comportamiento de inicios tardíos del SAMS durante 1979-2005, como lo sugieren los demás índices considerados en este estudio. La incertidumbre al momento de calcular las EOFc considerando los océanos (que sugiere sensibilidad del índice LISAM al dominio seleccionado), y la cantidad de inicios y finales falsos que genera el índice al emplear datos diarios, son algunos de los aspectos a considerar cuando se considere el uso del índice LISAM.

El índice que parece representar mejor las características del SAMS tanto en superficie como en la alta troposfera es el basado en precipitación, el cual, a su vez, es el único que muestra un acuerdo en los finales tempranos obtenidos para los estados de Mato Grosso y Rondonia, según lo identificado por Debortoli et al. (2015). Sin embargo, los tres índices empleados presentan dificultades para representar la formación, evolución y posterior debilitamiento del Alta de Bolivia, mientras que la representación en superficie, tanto de la circulación de vientos como de la evolución de precipitación, por parte de los tres métodos es bastante acertada.

Además, se encontraron cambios en la caracterización del SAMS al incluir dentro del dominio espacial la región del noreste de Brasil. Nuestros resultados sugieren que debido a que el noreste de Brasil es una región con ocurrencia de mayor precipitación en el otoño austral, con mayores duraciones de su temporada seca, y en general con regímenes de precipitación diferentes a la zona monzónica en Suramérica, la inclusión de esta región dentro de las estimaciones (principalmente) del inicio del SAMS tiende a alterar los resultados, debilitando las tendencias de inicios tardíos durante el periodo considerado.

## Referencias

- Agudelo, J., Arias, P.A., Vieira, S. C., & Martínez, J.A. (2019). Influence of longer dry seasons in the Southern Amazon on patterns of water vapor transport over northern South America and the Caribbean. *Climate Dynamics*, doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4285-1>, 52, 2647-2665.
- Arias, P. A., Fu, R., Vera, C., & Rojas, M. (2015). A correlated shortening of the North and South American monsoon seasons in the past few decades. *Climate dynamics*, 45(11-12), 3183-3203.
- Boisier, J. P., Ciais, P., Ducharne, A., & Guimberteau, M. (2015). Projected strengthening of Amazonian dry season by constrained climate model simulations. *Nature Climate Change*, 5(7), 656.
- Butt, N., P. A. de Oliveira, and M. H. Costa (2011), Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil, *J. Geophys. Res.*, 116, D11120, doi:10.1029/2010JD015174.
- Carvalho, L. M., Silva, A. E., Jones, C., Liebmann, B., Dias, P. L. S., & Rocha, H. R. (2011). Moisture transport and intraseasonal variability in the South America monsoon system. *Climate dynamics*, 36(9-10), 1865-1880.
- Carvalho, L. M., & Jones, C. (2013). CMIP5 simulations of low-level tropospheric temperature and moisture over the tropical Americas. *Journal of climate*, 26(17), 6257-6286.
- Chen, M., Shi, W., Xie, P., Silva, V. B., Kousky, V. E., Wayne Higgins, R., & Janowiak, J. E. (2008). Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D4), doi:10.1029/2007JD009132.

- Costa, M.H & Pires, G.F. (2010): Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *International Journal of Climatology*, 30(13), 1970-1979.
- da Silva, V. D. P. R. (2004). On climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, 58(4), 575-596.
- da Silva, A. E., & de Carvalho, L. M. V. (2007). Large-scale index for South America monsoon (LISAM). *Atmospheric Science Letters*, 8(2), 51-57.
- Debortoli, N. S., Dubreuil, V., Funatsu, B., Delahaye, F., De Oliveira, C. H., Rodrigues-Filho, S., ... & Fetter, R. (2015). Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Climatic change*, 132(2), 251-264.
- Fu, R., & Li, W. (2004). The influence of the land surface on the transition from dry to wet season in Amazonia. *Theoretical and applied climatology*, 78(1-3), 97-110.
- Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P. A., Dickinson, R. E., Huang, L., ... & Myneni, R. B. (2013). Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(45), 18110-18115.
- Gan, M. A., Kousky, V. E., & Ropelewski, C. F. (2004). The South America monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. *Journal of climate*, 17(1), 47-66.
- Gan, M. A., Rao, V. B., & Moscati, M. C. (2006). South American monsoon indices. *Atmospheric Science Letters*, 6(4), 219-223.
- Horel, J. D., Hahmann, A. N., & Geisler, J. E. (1989). An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *Journal of Climate*, 2(11), 1388-1403.
- Jones, C., & Carvalho, L. M. (2013). Climate change in the South American monsoon system: present climate and CMIP5 projections. *Journal of Climate*, 26(17), 6660-6678.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... & Zhu, Y. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), 437-472.
- Kousky, V. E. (1988). Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 3(1), 217-231.
- Leite-Filho, A. T., de Sousa Pontes, V. Y., & Costa, M. H. (2019). Effects of deforestation on the onset of the rainy season and the duration of dry spells in southern Amazonia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD029537>
- Liebmann, B., & Smith, C. A. (1996). Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(6), 1275-1277.

- Liebmann, B., & Marengo, J. (2001). Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, *14*(22), 4308-4318.
- Li, W., & Fu, R. (2004). Transition of the large-scale atmospheric and land surface conditions from the dry to the wet season over Amazonia as diagnosed by the ECMWF re-analysis. *Journal of Climate*, *17*(13), 2637-2651.
- Lucena, D. B., Servain, J., & Gomes Filho, M. F. (2011). Rainfall response in Northeast Brazil from ocean climate variability during the second half of the twentieth century. *Journal of Climate*, *24*(23), 6174-6184.
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Kousky, V. E., Filizola, N. P., & Wainer, I. C. (2001). Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. *Journal of Climate*, *14*(5), 833-852.
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. L. D., Cavalcanti, I. F. A., ... & Saulo, A. C. (2012). Recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, *32*(1), 1-21.
- Ramos, R. P. L. (1975). Precipitation characteristics in the Northeast Brazil dry region. *Journal of Geophysical Research*, *80*(12), 1665-1678.
- Ruiz-Vásquez, M., Arias, P.A., Martínez, J.A., & Espinoza, J.C. (2019). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, under review.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... & Liu, H. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *91*(8), 1015-1058.
- Seth A, Rojas M, Rauscher SA (2010) CMIP3 projected changes in the annual cycle of the South American monsoon. *Clim Change* 98:331–357. doi:10.1007/s10584-009-9736-6
- Utida, G., Cruz, F. W., Etourneau, J., Bouloubassi, I., Schefuß, E., Vuille, M., ... & Zular, A. (2019). Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific reports*, *9*(1), 1698.
- Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., ... & Nogue-Paegle, J. (2006). Toward a unified view of the American monsoon systems. *Journal of climate*, *19*(20), 4977-5000.
- Wang, H., & Fu, R. (2002). Cross-equatorial flow and seasonal cycle of precipitation over South America. *Journal of Climate*, *15*(13), 1591-1608.
- Wayne Higgins, R., Douglas, A., Hahmann, A., Berbery, E. H., Gutzler, D., Shuttleworth, J., ... & Douglas, M. (2003). Progress in Pan American CLIVAR research: the North American monsoon system. *Atmosfera*, *16*(1), 29-65.
- Wright, J. S., Fu, R., Worden, J. R., Chakraborty, S., Clinton, N. E., Risi, C., ... & Yin, L. (2017). Rainforest-initiated wet season onset over the southern Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *114*(32), 8481-8486.

Xie, P., Janowiak, J. E., Arkin, P. A., Adler, R., Gruber, A., Ferraro, R., ... & Curtis, S. (2003). GPCP pentad precipitation analyses: An experimental dataset based on gauge observations and satellite estimates. *Journal of Climate*, 16(13), 2197-2214.

Yin, L., R. Fu, Y. Zhang, P.A. Arias, N. Fernando, W. Li, K. Fernandes, & A. Bowerman (2014): What controls interannual variations of the wet season onsets over the Amazon?. *Journal of Geophysical Research*, 119(5), 2314-2328, doi: 10.1002/2013JD021349.

Zhou, J., & Lau, K. M. (1998). Does a monsoon climate exist over South America?. *Journal of climate*, 11(5), 1020-1040.